

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
UNIDADE FRUTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS**

**DESTINO E USO SUSTENTÁVEL DO LODO GERADO NAS
BACIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Alessandra Cristina de Campos
Assistente Social

**FRUTAL-MG
2025**

Alessandra Cristina de Campos

**DESTINO E USO SUSTENTÁVEL DO LODO GERADO NAS
BACIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Frutal, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora
Dra. Viviane Modesto Arruda

Coorientador
Dr. Jhansley Ferreira da Mata

**FRUTAL-MG
2025**

Campos, Alessandra Cristina de

C198d Destino e Uso Sustentável do Lodo Gerado nas Bacias de Tratamento de Esgoto.

157 f. : il. color., fig., tab.

Orientador: Dr^a. Viviane Modesto Arruda. Co-Orientador: Dr. Jhansley Ferreira da Mata.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Minas Gerais, UEMG. Unidade Frutal, 2025.

1. Água tratada. 2. Cenário socioambiental. 3. Efluentes. 4. Estações de tratamento de esgoto. 5. Gestão ambiental. I. Arruda, Viviane Modesto. II. Costa, Gustavo Henrique Gravatim. III. Universidade do Estado de Minas Gerais – Unidade Frutal. IV. Titulo.

CDU: 628.336

Catalogação na fonte
Nereida Nanci Pimenta dos Santos – CRB-6/4379/O



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Ata

ALESSANDRA CRISTINA CAMPOS

"DESTINO E USO SUSTENTÁVEL DE TRATAMENTO DE ESGOTO"

Dissertação apresentada a Universidade do Estado de Minas Gerais, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, na área de concentração Ciências Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologia, Ambiente e Sociedade, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 14 de março 2025

Prof. Dr. Rodinei Facco Pegoraro - UFMG - Montes Claros

Prof. Dr. Leandro de Souza Pinheiro -UEMG - Frutal

PROF^a. DR^a. VIVIANE MODESTO ARRUDA

UEMG UBA/ORIENTADORA



Documento assinado eletronicamente por **Leandro de Souza Pinheiro, Diretor**, em 24/03/2025, às 17:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Viviane Modesto Arruda, Professora de Educação Superior**, em 25/03/2025, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodinei Facco Pegoraro, Usuário Externo**, em 27/03/2025, às 08:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos aos meus orientadores, professora Dra. Viviane Arruda Modesto e professor Dr. Jhansley Ferreira da Mata, aos quais sou extremamente grata pelos conselhos, pelo apoio e, especialmente, pela paciência. Considerando ser discente atuando na pesquisa em área adversa à formação, vocês sempre foram muito delicados em suas expressões, no jeito, nas palavras, e esse carinho expressado por vocês não tem preço. O conhecimento que adquiri até aqui foi pelo incentivo de ambos; sou muito grata por vocês terem feito parte desse momento da minha vida.

Quero estender meus agradecimentos ao professor Dr. Rodrigo Milan pelo apoio e pela autorização para assistir às aulas de microbiologia, conteúdo este que me ajudou muito no momento da análise dos meus dados.

Ao Prof. Dr. Filipe Corrêa Guizellini, com seu conhecimento imenso, gentileza, sabedoria e paciência acima de tudo; contribuiu para ampliar meus conhecimentos e aumentar a compreensão sobre os meus dados.

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Bebedouro – SAAEB Ambiental, pelo consentimento concedido para a realização da pesquisa nas Estações de Tratamento de Esgoto e nas fontes de abastecimento de água.

Aos amigos Silmara, Ronaldo, Beatriz e Gabriel, que me incentivaram a deixar as especializações *lato sensu* para iniciar uma nova jornada *stricto sensu*, meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos do mestrado, meus sinceros agradecimentos pelas palavras de incentivo, pelas lutas, pelos risos e pelas tristezas que passamos juntos.

As amigas de pesquisa, Daniela (colombiana) e Palmira (moçambicana), muito obrigada pelo apoio em todos os momentos da pesquisa.

Aos alunos da graduação de agronomia, meus sinceros agradecimentos pelo apoio à minha pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos à Maisa, pessoa por quem tenho muito carinho, sempre disposta a nos orientar.

Agradeço, especialmente, à minha mãe (*in memoriam*), por ser a base da minha força, resiliência e perseverança diante das adversidades. Nossa jornada juntas foi curta, mas o legado deixado foi grandioso!

RESUMO

A questão do esgoto no Brasil apresenta desafios que afetam o meio ambiente e a saúde pública. A migração da população rural para as zonas urbanas resultou no aumento da produção diária de esgoto, que, muitas vezes, tem tratamento inadequado ou inexistente. Com isso, a gestão de efluentes torna-se um desafio ambiental significativo, especialmente para essas áreas urbanas. Desse modo, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) são essenciais para mitigar os impactos ambientais dos resíduos líquidos. A legislação brasileira possui padrões rigorosos para o tratamento de efluentes, dado que a separação dos efluentes domésticos e industriais requer abordagens específicas devido às suas diferentes composições. O lodo, conhecido como biossólido, é resultante do processo de tratamento de esgoto e águas residuais, cuja composição é complexa e variável, dependendo da origem do esgoto, dos processos de tratamento aplicados e das características específicas do sistema de coleta e transporte. Em razão disso, a pesquisa pretendeu caracterizar o efluente e o biossólido provenientes das ETEs rurais (Botafogo e Turvânia) e urbanas (Jardim Itália, Mandembo, Pedro Paschoal e São Carlos) do município de Bebedouro/SP, além de analisar a qualidade da água distribuída e traçar o perfil socioambiental da comunidade do entorno. Para tanto, realizaram-se, entre 2023 e 2024, análises física, química e microbiológica, cujos resultados foram confrontados com as normativas vigentes, notadamente a Resolução CONAMA n.º 430/2011. Os resultados revelaram que, embora as ETEs apresentem eficiência na remoção de certos poluentes, parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e as diversas formas de nitrogênio, em alguns casos, encontraram-se em desconformidade com os limites legais, indicando a influência de fatores antrópicos. Quanto ao biossólido, constatou-se seu potencial para uso agrícola, devido às elevadas concentrações de fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Contudo, a presença de metais pesados em algumas amostras demanda monitoramento rigoroso para garantir a segurança de sua aplicação. A análise socioambiental, por sua vez, evidenciou um significativo desconhecimento da população sobre práticas de gestão de resíduos, como a coleta seletiva. Conclui-se que a otimização da gestão dos efluentes e biossólidos no município é imperativa e transcende as melhorias puramente técnicas, exigindo a implementação de programas de educação e mobilização social.

Palavras-chave: Água tratada. Cenário socioambiental. Efluentes. Estações de tratamento de esgoto. Gestão ambiental.

DESTINATION AND SUSTAINABLE USE OF SLUDGE GENERATED IN SEWAGE TREATMENT BASINS

ABSTRACT

Currently, sewage management in Brazil presents significant environmental and public health challenges. Rural-to-urban migration has led to increased daily sewage production, often subjected to inadequate or nonexistent treatment. This situation makes effluent management a major environmental challenge, particularly in urban areas. Consequently, sewage treatment plants (STPs) play a crucial role in mitigating the environmental impacts of liquid waste. Brazilian legislation establishes strict standards for effluent treatment, while the distinct compositions of domestic and industrial effluents demand specific treatment approaches. Sludge, also known as biosolids, is a byproduct of sewage and wastewater treatment, with a complex and variable composition depending on the sewage source, the treatment processes applied, and the specific collection and transportation system characteristics. In this context, this study aimed to characterize the effluent and biosolids from rural (Botafogo and Turvária) and urban (Jardim Itália, Mandembo, Pedro Paschoal, and São Carlos) STPs in the municipality of Bebedouro/SP, in addition to assessing the quality of distributed water and the socio-environmental profile of the surrounding community. Between 2023 and 2024, physical, chemical, and microbiological analyses were conducted, and the results were benchmarked against prevailing regulatory standards, notably CONAMA Resolution No. 430/2011. The findings revealed that, although the STPs demonstrated efficiency in removing certain pollutants, key parameters such as biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), and various nitrogen forms, in some cases, exceeded established legal limits, indicating the influence of anthropogenic factors. The biosolids showed potential for agricultural application due to high concentrations of phosphorus (P), calcium (Ca), and magnesium (Mg). However, the presence of heavy metals in some samples necessitates strict monitoring to ensure safe application. The socio-environmental analysis, in turn, highlighted a significant lack of public awareness regarding waste management practices, such as selective waste collection. In conclusion, optimizing effluent and biosolid management in the municipality is imperative and transcends purely technical improvements, requiring the implementation of education and social mobilization programs.

Keywords: Treated water. Socio-environmental scenario. Effluents. Sewage treatment plants. Environmental management.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 1 — Panorama da distribuição do esgoto gerado no Brasil.....	15
Figura 2 — Parcela da população brasileira, por região, com esgotamento sanitário adequado....	15
Figura 3 — Sistema de tratamento de esgoto e suas principais fases de formação do lodo.....	19

Capítulo 3

Figura 4 — Mapa de localização do município e das estações de tratamento de esgoto de Bebedouro/SP.....	40
Figura 5 — Fluxograma do efluente da estação de tratamento de esgoto.....	42
Figura 6 — Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), na entrada e saída, entre os anos de 2023 e 2024.....	44
Figura 7 — Concentrações de nitrogênio amoniacal (mg/L), nitrogênio Kjeldahl (mg/L), nitrogênio nitrato (mg/L), nitrogênio nitrito (mg/L), nitrogênio orgânico (mg/L), nitrogênio total (mg/L), nitrato (mg/L) e nitrito (mg/L) na entrada e saída, entre 2023 e 2024, da estação de tratamento de esgoto de Turvínia, zona rural.....	47
Figura 8 — Concentrações da demanda bioquímica de oxigênio (DBO total), demanda química de oxigênio (DQO total), nitrogênio total, nitrogênio nitrato (NO_3^-) e oxigênio dissolvido (OD), encontradas na saída da estação de tratamento, entre os anos de 2023 e 2024,.....	54
Figura 9 — Análise do nitrogênio nitrito, na entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	58
Figura 10 — Análise do nitrogênio orgânico, na entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	59
Figura 11 — Análise do fósforo total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	60
Figura 12 — Análise da demanda química de oxigênio (DQO), na entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	61
Figura 13 — Análise do nitrogênio total (mg/L), entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	61
Figura 14 — Análise do nitrogênio total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024.....	62
Figura 15 — Análise do fósforo total, entre 2023 e 2024, com baixo desempenho.....	65
Figura 16 — Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), entre 2023 e 2024, com baixo desempenho.....	66
Figura 17 — Substâncias solúveis em hexano, materiais sedimentáveis, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio orgânico, nitrato e nitrito obtidas em amostras de efluente coletado na entrada e saída da estação de tratamento de esgoto São Carlos, zona urbana, entre 2023 e 2024.....	67
Figura 18 — Avaliação das formas nitrogenadas (nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio orgânico, nitrato e nitrito) entre 2023 e 2024.....	72
Figura 19 — Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) entre 2023 e 2024.....	74
Figura 20 — Análise dos materiais sedimentáveis entre 2023 e 2024.....	75
Figura 21 — Análise do nitrogênio amoniacal (NH_3) entre 2023 e 2024.....	75
Figura 22 — Análise do nitrogênio total entre 2023 e 2024.....	76
Figura 23 — Análise do oxigênio dissolvido entre 2023 e 2024.....	76
Figura 24 — Parâmetros que apresentaram melhorias na eficiência dos tratamentos biológico e químico.....	77

Capítulo 4

Figura 25 — Comparação entre resultado e limite máximo permitido de concentração de nitrito-N (mg/L).....	87
Figura 26 — Medição de sulfeto de hidrogênio no biossólido das ETEs.....	96

Figura 27 — Medição de sulfeto de hidrogênio e do ponto de fulgor no biossólido das ETEs.....	97
Figura 28 — Medição do parâmetro percentual de sólidos secos presentes no biossólido das ETEs.....	98
Figura 29 — Medição do parâmetro cianeto total presente no biossólido das ETEs.....	99
Figura 30 — Medição do parâmetro de óleos e graxas presentes no biossólido das ETEs.....	100
Figura 31 — Medição do parâmetro de pH no biossólido das ETEs.....	101
Figura 32 — Demonstrativo dos elementos químicos bário e chumbo existentes nos biossólidos das ETEs.....	102
Figura 33 — Demonstrativo de elementos químicos existentes nos biossólidos das ETEs.....	103
 Capítulo 5	
Figura 34 — Estações de tratamento de esgoto e respectivos bairros dos territórios.....	121
Figura 35 — Mapa de Bebedouro/SP, sinalizando a localização das estações de tratamento de esgoto do município e o território do entorno.....	121
Figura 36 — Demonstrativo de evolução da população entre os anos 1970 e 2022, e 2000 e 2020.....	122
Figura 37 — Identificação de gênero.....	123
Figura 38 — Caracterização da população bebedourense por faixa etária e sexo em porcentagem.....	124
Figura 39 — Identificação da faixa etária participante da pesquisa e evolução da população por grupos de idade.....	126
Figura 40 — Percentual de participantes e evolução da população nas zonas urbana e rural.....	128
Figura 41 — Caracterização do estado civil e da unidade familiar dos entrevistados.....	129
Figura 42 — Caracterização da renda familiar.....	131
Figura 43 — Caracterização do tipo do domicílio e abastecimento de água.....	131
Figura 44 — Interrupção e periodicidade do abastecimento, aspecto da água em cor, odor, sabor, característica do odor e do sabor, presença de materiais sólidos e temperatura.....	136
Figura 45 — Consumo de água tratada e periodicidade da troca dos filtros.....	138
Figura 46 — Doenças ocasionadas pelo consumo de água contaminada.....	140
Figura 47 — Identificação das cores da coleta seletiva.....	142
Figura 48 — Levantamento do conhecimento da comunidade do município em relação aos meios de coleta seletiva.....	143
Figura 49 — Panorama geral em conhecimento sobre compostagem, central de compostagem e realização de compostagem doméstica.....	145

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2	
Tabela 1 — Valores de referência da normatização brasileira.....	25
Capítulo 3	
Tabela 2 — Concentração de substâncias solúveis em hexano, materiais sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, nitrito, nitrato, pH e oxigênio dissolvido, na entrada e saída do tratamento, em comparação aos anos de 2023 e 2024 para a estação Turvária (distrito), considerando o Dec. n.º 8.468/76 e a Resolução CONAMA n.º 430/11.....	45
Tabela 3 — Análise do oxigênio dissolvido na entrada e saída do tratamento do efluente, com percentual de redução entre 2023 e 2024.....	56
Tabela 4 — Análise comparativa do nitrogênio total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024, e incertezas.....	62
Tabela 5 — Concentração de nitrogênio total ($131,1 \text{ mg L}^{-1}$) coletado na estação de tratamento de esgoto, na saída, no ano de 2023, em comparação aos limites das legislações brasileira, europeia e norte-americana.....	63
Tabela 6 — Concentração de nitrogênio total ($118,1 \text{ mg L}^{-1}$) coletado na estação de tratamento de esgoto, na saída, no ano de 2024, em comparação aos limites das legislações brasileira, europeia e norte-americana.....	63
Tabela 7 — Comparação dos valores de entrada e saída do nitrogênio total, entre 2023 e 2024, nos limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia.....	68
Tabela 8 — Comparação dos valores de saída do nitrogênio total, em 2023, nos limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia.....	69
Tabela 9 — Comparação dos valores de saída nitrogênio total, ano 2024, limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia.....	69
Capítulo 4	
Tabela 10 — Resultados de análise química das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana.....	88
Tabela 11 — Resultados complementares de análise química das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana.....	88
Tabela 12 — Resultados de micronutriente e análise física das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana.....	89
Tabela 13 — Comparação das análises percentuais de sólidos secos das ETEs relacionada com a legislação vigente.....	97
Tabela 14 — Comparação das análises de óleos e graxas das ETEs relacionada com a legislação vigente.....	99
Tabela 15 — Comparação das análises do pH das ETEs relacionada com a legislação vigente.....	100
Capítulo 5	
Tabela 16 — Caracterização da população bebedourense por faixa etária e sexo, em 2023.....	125

CERTIFICADO DA COMISSÃO DE ÉTICA EM PESQUISA

- DADOS DA VERSÃO DO PROJETO DE PESQUISA

Titulo da Pesquisa: DESTINO E USO SUSTENTÁVEL DO LODO GERADO NAS BACIAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Pesquisador Responsável: ALESSANDRA CRISTINA DE CAMPOS

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 77943724.0.0000.0197

Submetido em: 08/04/2024

Instituição Proponente: Unidade UEMG: Campus Frutal

Situação da Versão do Projeto: Aprovado

Localização atual da Versão do Projeto: Pesquisador Responsável

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio



Comprovante de Recepção:



PB_COMPROMVENTE_RECEPCAO_2273466

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO GERAL.....	13
CAPÍTULO 2 — REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1. Produção de esgoto no Brasil.....	14
2.2. Efluente da estação de tratamento de esgoto.....	17
2.3. Tratamento e caracterização do lodo de esgoto.....	18
2.4. Normatização e legislação do tratamento de esgoto.....	23
2.5. Cenário socioambiental e qualidade da água.....	27
REFERÊNCIAS.....	31
CAPÍTULO 3 — CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTE DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS.....	38
Resumo.....	38
Palavras-chave.....	38
Título em inglês.....	38
Abstract.....	38
Keywords.....	39
3.1. Introdução.....	39
3.2. Material e Métodos.....	40
3.2.1. Fluxograma do efluente da estação de tratamento de esgoto.....	41
3.3. Resultados.....	43
3.3.1. Estação de tratamento de esgoto — distrito de Turvária, zona rural.....	43
3.3.2. Estação de tratamento de esgoto — distrito de Botafogo, zona rural.....	53
3.3.3. Estação de tratamento de esgoto — São Carlos, zona urbana.....	60
3.3.4. Estação de tratamento de esgoto — Jardim Itália, zona urbana.....	68
3.3.5. Estação de tratamento de esgoto — Pedro Paschoal, zona urbana.....	73
3.5. Discussão.....	78
3.6. Conclusão.....	80
REFERÊNCIAS.....	81
CAPÍTULO 4 — CARACTERÍSTICAS FÍSICA E QUÍMICA, E TEOR DE METAIS PESADOS DO BIOSSÓLIDO PROVENIENTE DA DISPOSIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETES).....	84

Resumo.....	84
Palavras-chave.....	84
4.1. Introdução.....	85
4.2. Material e método.....	86
4.3. Resultados e discussão.....	88
<i>4.3.1. Análises química, física e de micronutrientes.....</i>	<i>88</i>
<i>4.3.2. Estação de tratamento de esgoto do distrito de Botafogo, zona rural.....</i>	<i>89</i>
<i>4.3.3. Estação de tratamento de esgoto do distrito de Turvânia, zona rural.....</i>	<i>90</i>
<i>4.3.4. Estações de tratamento de esgoto na zona urbana.....</i>	<i>90</i>
<i>4.3.5. Análise de glanolumetria e fertilidade do biossólido gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs).....</i>	<i>92</i>
<i>4.3.6. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10004, e as internacionais.....</i>	<i>94</i>
<i>4.3.7. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10005, e as internacionais.....</i>	<i>102</i>
<i>4.3.8. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10006 e as internacionais.....</i>	<i>104</i>
4.4. Conclusão.....	110
REFERÊNCIAS.....	112
CAPÍTULO 5 — CENÁRIO SOCIOAMBIENTAL E QUALIDADE DA ÁGUA DO CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO.....	115
Resumo.....	115
Palavras-chave.....	115
5.1. Introdução.....	116
5.2. Material e método.....	116
<i>5.2.1. Análises física, química e microbiológica da água do centro de distribuição.....</i>	<i>116</i>
<i>5.2.2. Coleta de dados socioeconômicos e ambientais.....</i>	<i>119</i>
5.3. Resultado e discussão.....	120
5.4. Conclusão.....	146
REFERÊNCIAS.....	147
CAPÍTULO 6 — CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	151

APÊNDICE.....	155
1Ap — Questionário socioambiental.....	156

CAPÍTULO 1 — INTRODUÇÃO GERAL

A gestão de efluentes apresenta desafios ambientais contemporâneos, especialmente nas áreas urbanas densamente povoadas. As estações de tratamento de esgoto (ETEs) exercem papel crucial na mitigação dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos líquidos. Porém, a operação dessas estações apresenta desafios técnicos e ambientais que precisam ser abordados para garantir sua eficácia e sustentabilidade (Brasil, 2018).

Os resíduos industriais presentes no esgoto representam uma preocupação social significativa devido à sua toxicidade e dificuldade de tratamento. Esses resíduos contêm substâncias químicas, metais pesados e compostos orgânicos sintéticos que não são facilmente biodegradáveis. A presença desses contaminantes pode comprometer os processos biológicos de tratamento de esgoto, sendo necessárias tecnologias avançadas, como processos físico-químicos e tratamentos terciários, para garantir a remoção eficaz (Braga *et al.*, 2023).

Os efluentes domésticos e industriais possuem características distintas, e a complexidade desses resíduos exige o desenvolvimento de abordagens e tecnologias avançadas para a sua eficaz remoção, separando o fluido do resíduo sólido — o lodo de esgoto (Lima, 2023). O lodo, rico em matéria orgânica e nutrientes, tem potencial para utilização na agricultura, desde que tenha tratamento adequado para eliminar patógenos e metais pesados. Regulamentações brasileiras como a Resolução CONAMA n.º 498/2020 (Brasil, 2020) são responsáveis por definir critérios e procedimentos para a produção e aplicação do lodo de esgoto na agricultura.

Nesse sentido, justifica-se o presente trabalho pela falta de estudos sobre o tratamento, descarte e uso do lodo gerado na bacia de tratamento de esgoto do município de Bebedouro/SP, analisando os impactos socioambientais desses biossólidos e propondo o aproveitamento no cultivo de espécies vegetais de acordo com a legislação brasileira. Trata-se de uma sugestão promissora para práticas agrícolas sustentáveis, com o intuito de reduzir impactos ambientais.

Ações dessa natureza são essenciais para harmonizar a operação das ETEs com o bem-estar das comunidades do território. Em vista disso, o objetivo geral deste trabalho é caracterizar e propor estratégias sustentáveis para a destinação do lodo das bacias de tratamento de esgoto. Para tanto, os objetivos específicos são: 1. analisar e caracterizar o efluente da estação de tratamento de esgoto; 2. caracterizar, por meio de análise físico-química, o lodo coletado nas bacias de tratamento de esgoto do município de Bebedouro/SP; 3. averiguar o perfil socioeconômico dos moradores do entorno da ETE.

CAPÍTULO 2 — REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Produção de esgoto no Brasil

O esgoto é caracterizado como água residual resultante das atividades humanas, abrangendo os usos doméstico, comercial e industrial (ABNT, 1986). Esse resíduo é classificado em diversos tipos, ou seja, possui variedade de substâncias e microrganismos. Os resíduos orgânicos constituem uma parcela significativa do esgoto, incluindo restos de alimentos, excretas humanas e outros materiais biodegradáveis ricos em matéria orgânica. Em contrapartida, os resíduos inorgânicos compreendem produtos químicos domésticos, como detergentes e substâncias inorgânicas dissolvidas na água, como sais minerais e metais pesados provenientes dos processos industriais (Fernandes; Casimiro, 2022).

Com base nos dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2017), constata-se que aproximadamente 2.421 municípios contam com sistemas públicos de esgotamento sanitário. Por outro lado, 670 municípios adotam soluções individuais alternativas, 1.013 municípios possuem coleta sanitária, mas o esgoto não recebe tratamento, e 1.466 municípios não dispõem de sistema público de esgotamento sanitário nem de nenhum tipo de tratamento, totalizando 5.570 municípios brasileiros (ANA, 2017). Esses dados foram sintetizados na Figura 1.

A produção de esgoto no Brasil é significativa, especialmente em áreas urbanas, onde a densidade populacional é maior. A distribuição diária brasileira da carga de esgoto equivale a 9,1 toneladas. Algumas regiões metropolitanas, como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, são as principais produtoras de esgoto devido à alta concentração populacional e à intensa atividade econômica, necessitando de gestão eficiente para evitar impactos na saúde (ANA, 2017).

Na Figura 1, apresenta-se um panorama do volume da carga de esgoto equivalente a 9,1 toneladas diárias:

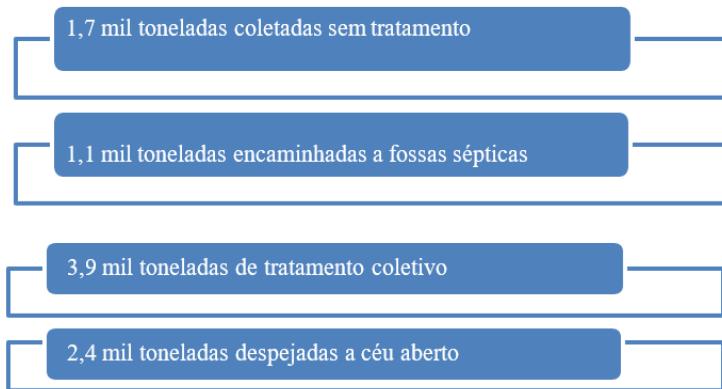


Figura 1 — Panorama da distribuição do esgoto gerado no Brasil. **Fonte:** ANA (2017)

De acordo com a ANA (2017), 43% da população possui esgoto coletado e tratado, 12% utiliza fossa séptica, 18% tem seu esgoto coletado e não tratado, e 27% não possui serviço de coleta sanitária nem outro tipo de tratamento adequado. A distribuição dessa situação por regiões brasileiras está ilustrada na Figura 2.

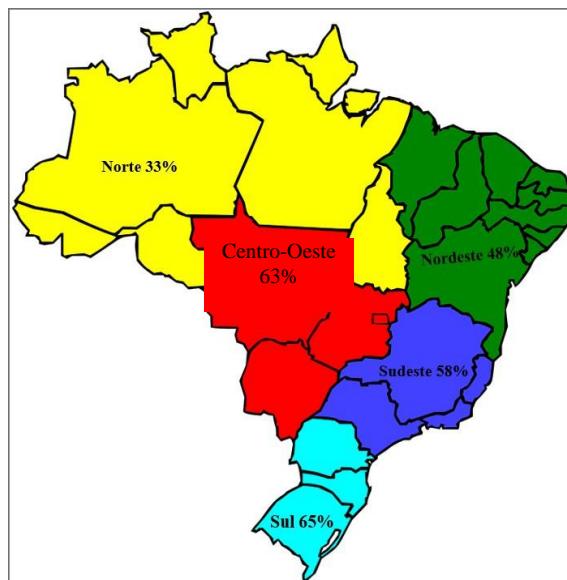


Figura 2 — Parcela da população brasileira, por região, com esgotamento sanitário adequado. **Fonte:** ANA (2017)

As excretas humanas, fezes e urinas, apresentam composição complexa tanto de matéria orgânica quanto de inorgânica. Em geral, contêm restos alimentares, albuminas, gorduras, hidratos de carbono, proteínas, sais e uma variedade de microrganismos (Brasil, 2018).

O esgoto doméstico consiste predominantemente em água, representando aproximadamente 99,9% do volume, enquanto 0,1% é composto por materiais orgânicos e

inorgânicos adicionados durante o processo de utilização, suspensos e dissolvidos, e microrganismos (Von Sperling, 2018). Embora a presença de matéria sólida nos esgotos seja mínima, essa pequena fração pode causar problemas significativos de poluição (Reis; Rosas, 2022).

As características físicas do esgoto doméstico são determinadas por fatores como matéria sólida, temperatura, odor, cor, turbidez e variação de vazão. Estima-se que 55% da população brasileira tenha atendimento adequado em relação ao esgotamento sanitário, que abrange os serviços de coleta e tratamento coletivo, bem como o tratamento individual realizado por meio de fossa séptica. Por outro lado, 45% da população não possui sistema público de tratamento de esgoto (ANA, 2017).

As características químicas do esgoto doméstico são determinadas pela presença de matéria orgânica e inorgânica. Cerca de 70% dos sólidos presentes no esgoto são de origem orgânica, compreendendo compostos como proteínas, carboidratos, gorduras, óleos, sulfatos e fenóis. Os compostos orgânicos são a combinação de carbono, hidrogênio, oxigênio e, às vezes, nitrogênio, enquanto a matéria inorgânica é composta principalmente por areia e substâncias minerais dissolvidas (Paes, 2022).

No aspecto biológico, o esgoto doméstico contém uma variedade de microrganismos, incluindo bactérias, fungos, protozoários, vírus e algas. As bactérias são importantes porque são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica, no ambiente natural e nas estações de tratamento. Ademais, organismos do grupo coliforme são frequentemente utilizados como indicadores de poluição de origem humana; sua presença em corpos d'água sugere o resíduo de esgoto, indicando possível presença de patógenos (Contarini *et al.*, 2022).

Os resíduos industriais presentes no esgoto representam uma preocupação significativa devido à sua toxicidade e à dificuldade de tratamento. Esses resíduos podem conter substâncias químicas, metais pesados e compostos orgânicos sintéticos que não são facilmente biodegradáveis. A presença desses contaminantes pode comprometer os processos biológicos de tratamento de esgoto e exigir tecnologias avançadas, como processos físico-químicos e tratamentos terciários, para garantir a remoção eficaz (Braga *et al.*, 2023).

O tratamento convencional de esgoto gera produtos e subprodutos nas fases sólida, líquida e gasosa, os quais serão detalhados com maior abrangência nos próximos tópicos. O Quadro 1 mostra a visão geral dos principais subprodutos gerados, suas destinações finais encontradas no Brasil e os impactos negativos causados ao meio ambiente.

Quadro 1 — Principais subprodutos gerados no tratamento de esgoto

Fase	Produto/subproduto	Destinação final	Impactos negativos
Gasosa	Biogás	Queimadores	- Influência do equipamento; - Emissões odorantes; - Emissões de metano na atmosfera; - Perda de potencial energético.
Líquida	Efluente final tratado	Corpo receptor	- Perda de nutrientes; - Poluição das águas; - Toxicidade aquática.
Sólida	Lodo e escuma	Aterros sanitários	- Gastos com transporte; - Emissão de gases de efeito estufa (GEE); - Redução da vida útil dos aterros.

Fonte: Aisse (2019), adaptado pela autora.

2.2. Efluente da estação de tratamento de esgoto

Os efluentes possuem características específicas e são classificados da seguinte forma: efluentes domésticos são gerados em residências e geralmente contêm alta carga de matéria orgânica, agentes patogênicos e substâncias poluentes provenientes de produtos de limpeza e higiene pessoal (CONAMA, 2011). De acordo com a Resolução n.º 430/2011 do CONAMA, o termo “efluente” refere-se aos despejos líquidos resultantes da variedade das atividades ou dos processos. Esses efluentes sofrem variação na composição e na origem, portanto é essencial compreendê-los para implementar medidas adequadas de tratamento e gestão (CONAMA, 2011).

Por outro lado, os efluentes industriais variam de acordo com o ramo de atividade e o tamanho da indústria. É necessário que o segmento realize análises com periodicidade devido à presença de metais pesados, produtos químicos orgânicos e inorgânicos altamente tóxicos e de difícil tratamento (Nkansah *et al.*, 2016). Outro exemplo é o efluente de esgoto, caracterizado como lixiviado, cuja origem provém dos aterros sanitários. Esse tipo de efluente apresenta características distintas, como alta coloração, turbidez e odor, devido à presença de ácidos orgânicos e diversos poluentes orgânicos e inorgânicos (Almeida; Campos, 2020).

Os efluentes de esgoto oriundos de ambientes hospitalares têm como principal característica o uso de antimicrobianos. Esse fato propicia a disseminação de genes de resistência no meio ambiente; aumenta-se o risco de disseminação de microrganismos resistentes e causadores de doenças, além de contaminações adicionais (Lima, 2023).

Por fim, os efluentes pluviais, gerados pelas chuvas, conduzem poluentes presentes na

superfície do solo, como sedimentos, nutrientes, metais pesados e agentes patogênicos, representando desafio adicional para a gestão da qualidade da água. A caracterização precisa desses efluentes é fundamental para garantir o cumprimento das normas ambientais e orientar o desenvolvimento de tecnologias e processos de tratamento eficazes e sustentáveis. Além disso, essa análise é essencial para o monitoramento da qualidade da água em rios e lagos próximos aos pontos de descarte, permitindo uma resposta rápida a possíveis problemas ambientais (Braga *et al.*, 2023).

2.3. Tratamento e caracterização do lodo de esgoto

O lodo é um resíduo gerado no processo de tratamento de esgoto e águas residuais. Sua composição é complexa e variável, dependendo da origem do esgoto, dos processos de tratamento aplicados e das características específicas do sistema de coleta e transporte. Em termos gerais, o lodo é constituído por uma mistura de água e sólidos, contendo alta concentração de matéria orgânica, nutrientes (como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, enxofre e outros), metais pesados, patógenos (bactérias, vírus, protozoários e helmintos) e variedade de compostos químicos, incluindo poluentes orgânicos persistentes e produtos farmacêuticos (Esperancini; Barbosa, 2021).

Durante o tratamento da água, o lodo é gerado principalmente nas etapas de decantação e filtração, correspondendo a 60-95% e 5-10% do volume total, respectivamente. Esse lodo é frequentemente descartado em corpos d'água, causando impactos ambientais negativos, como o assoreamento de rios e a contaminação aquática (Mangelli, 2023).

O lodo primário é composto por sólidos sedimentáveis de esgoto bruto, enquanto o lodo secundário é formado na etapa biológica do tratamento, que é conhecido como lodo biológico ou lodo excedente (Santos, 2023), este, formado através do processo de tratamento de águas residuais (Figura 3).

O processo de tratamento de águas residuais inicia-se pelo ponto A (grades), tanques com telas que retêm todo tipo de lixo jogado na rede pública de esgoto; em seguida, passa pelo ponto B (caixa de areia), retirando a areia e pequenos detritos que passam pelo processo anterior; no decantador primário (C) ocorre a sedimentação das partículas pesadas encontradas no esgoto; no tanque de aeração (D), os microrganismos presentes no esgoto multiplicam-se com o ar e formam o lodo; na etapa do decantador secundário (E), o lodo formado fica no fundo do tanque, e a parte líquida é liberada sem impurezas; no descarte (F), o esgoto clarificado e

corretamente tratado é devolvido ao meio ambiente (Figura 3).

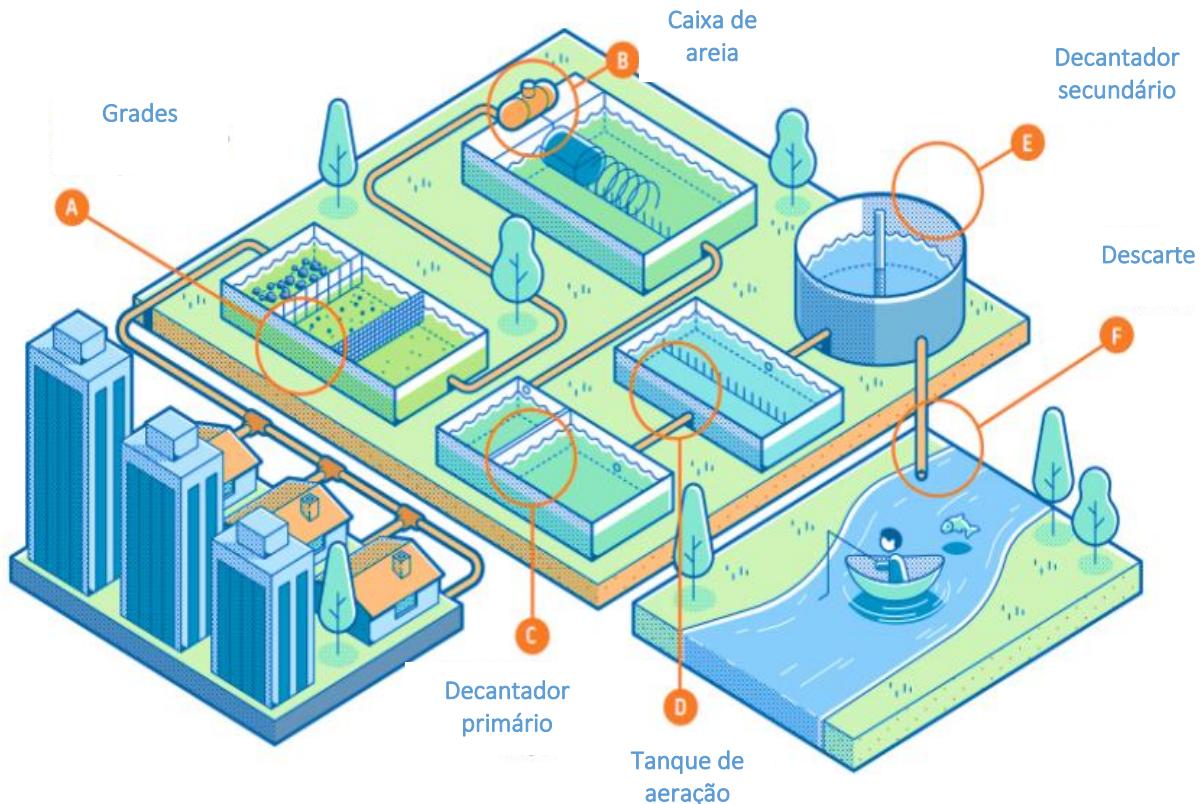


Figura 3 — Sistema de tratamento de esgoto e suas principais fases de formação do lodo. **Fonte:** BRK Ambiental (2023), adaptada pela autora

Andreoli, Fernandes e Von Sperling (2001) apresentam diferentes tipos de lodo em diversas fases:

Lodo primário: gerado em processos que recebem esgoto bruto de decantadores primários, como é o caso dos sistemas de lodos ativados. Esse lodo é composto pelos sólidos sedimentáveis presentes no esgoto bruto.

Lodo secundário ou biológico: constituído pela biomassa presente no sistema de tratamento. Se os microrganismos não forem parcialmente removidos do processo, eles podem se multiplicar excessivamente e prejudicar a qualidade do efluente final. Esse tipo de lodo é gerado em todos os tipos de tratamento biológico de esgoto.

Lodo misto: formado quando o tratamento de esgoto permite que o lodo primário seja tratado em conjunto com o lodo secundário.

Lodo químico: gerado a partir da etapa físico-química do tratamento de esgoto, que tem como objetivo polir o efluente secundário ou melhorar o desempenho do decantador primário (Andreoli; Fernandes; Von Sperling, 2001, p. 484).

Essas distintas formas de lodo são resultantes do tratamento de esgoto e possuem

características específicas em cada fase do processo. É importante considerar essas diferentes composições e origens na gestão adequada do lodo gerado durante o tratamento (Jordão; Pessôa, 2011). A caracterização do lodo envolve análises físicas, químicas e biológicas para determinar sua composição e propriedades. Entre os parâmetros físicos, destacam-se a densidade, o teor de sólidos totais e voláteis, a viscosidade e a cor.

As análises químicas incluem a determinação de macro e micronutrientes (como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio), a presença de metais pesados (como cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio) e de compostos orgânicos específicos (como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e bifenilos policlorados). As análises biológicas focam a identificação e quantificação de patógenos, avaliando o potencial de risco sanitário associado ao uso do lodo (Bezerra, 2014).

Segundo a Lei n.º 12.305/2010, o lodo deve ser disposto em aterros sanitários ou destinado à incineração (Brasil, 2010). Essas práticas são onerosas, incentivando a pesquisa de alternativas mais viáveis. Uma dessas alternativas é a aplicação do lodo no solo como condicionante, desde que não apresente periculosidade (Santos, 2023). Outra possibilidade é a utilização do lodo na produção de cerâmica. Estudos evidenciam que a presença de ferro e outros minerais no lodo permite sua utilização na produção de blocos leves para ornamentação (Costa, 2012).

O lodo tratado pode ser reutilizado de diversas formas, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a economia circular. Um dos usos mais comuns do lodo é como fertilizante na agricultura. Devido ao seu alto teor de matéria orgânica e nutrientes essenciais, o lodo pode melhorar a fertilidade do solo, promovendo o crescimento das plantas e aumentando a produtividade agrícola. No entanto, para ser usado de forma segura na agricultura, o lodo deve ser tratado adequadamente para reduzir ou eliminar patógenos e minimizar a presença de metais pesados, evitando, assim, riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Cechetti, 2022).

Além do uso agrícola, outro uso importante do lodo é na geração de biogás, por meio de processos de digestão anaeróbia. O biogás produzido pode ser utilizado como fonte de energia renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e da dependência de combustíveis fósseis (Silva, 2024).

Embora a utilização do lodo apresente possibilidades de aproveitamento com segurança, ele requer avaliação e estudos biológicos que comprovem sua inocuidade em termos de risco ecotoxicológico. Para assegurar sua aplicação de maneira segura e eficiente, especialmente na

agricultura e na recuperação de áreas degradadas, é primordial realizar análises detalhadas de suas propriedades físico-químicas e microbiológicas. Essas análises permitem a caracterização adequada do lodo, determinando sua composição, possíveis contaminantes e o nível de tratamento necessário para seu reaproveitamento ou disposição final segura (Santos, 2023).

As análises físico-químicas do lodo visam identificar e quantificar seus componentes sólidos e líquidos, bem como determinar a presença de nutrientes e contaminantes. Essas análises são fundamentais para compreender a qualidade do lodo e sua adequação para diferentes aplicações. Dentre elas, tem-se o teor de sólidos totais (STs), o qual mede a quantidade total de sólidos presentes no lodo, incluindo sólidos suspensos e dissolvidos. Sendo assim, o teor de sólidos é um indicador importante da consistência do lodo e influencia diretamente os processos de tratamento e disposição (Salgot; Folch, 2018).

Por outro lado, o teor de sólidos voláteis (SVs) representa a fração orgânica dos sólidos totais e é utilizado para avaliar a biodegradabilidade do lodo e seu potencial para a digestão anaeróbia (Vieira, 2022). Outro parâmetro importante é o pH do lodo, que afeta a solubilidade de metais pesados e a atividade microbiológica. Valores de pH extremos podem indicar a necessidade de tratamento para estabilização (APHA, 2017). A presença de metais pesados, como cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio, é averiguada devido ao potencial tóxico desses elementos. Altas concentrações de metais pesados podem limitar o uso do lodo na agricultura (Pereira *et al.*, 2023).

A análise de nutrientes como nitrogênio e fósforo é essencial para determinar o valor fertilizante do lodo. Esses nutrientes são centrais para o crescimento das plantas e podem substituir fertilizantes minerais. Além dos nutrientes, a matéria orgânica, incluindo a quantificação de compostos como hidrocarbonetos e substâncias húmicas, é importante para entender o potencial de decomposição e impacto ambiental do lodo (Monteiro, 2023).

O potencial de decomposição está com frequência associado aos compostos descritos anteriormente em conjunto com microrganismos. Sendo assim, as análises microbiológicas do lodo são realizadas para identificar e quantificar a presença de patógenos e outros microrganismos que podem representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Essas análises são imprescindíveis para avaliar a segurança do lodo para uso agrícola ou outras aplicações (Gubel, 2024).

Entre as análises microbiológicas, destaca-se principalmente a de coliformes totais, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, ovos de helmintos e vírus entéricos. A presença de

coliformes totais e *E. coli* é um indicador da contaminação fecal do lodo. Esses indicadores são usados para avaliar a eficiência dos processos de desinfecção e a segurança microbiológica do lodo (APHA, 2017).

A detecção de *Salmonella spp.* é crucial, pois essas bactérias patogênicas podem causar doenças graves em humanos e animais. A presença de *Salmonella spp.* pode restringir o uso do lodo em diversas aplicações (Abreu Júnior, 2005). Com semelhante finalidade, a análise de ovos de helmintos, como *Ascaris lumbricoides*, é importante para avaliar o risco de infecções parasitárias. Os helmintos são resistentes a muitos processos de tratamento, exigindo métodos específicos para sua inativação (Silva, 2017). Por fim, a presença de vírus entéricos, como rotavírus e adenovírus, é analisada devido ao potencial de esses vírus causarem gastroenterites. A detecção de vírus é um desafio técnico e requer métodos avançados de análise (Osuolale; Okoh, 2017).

Nesse contexto, nota-se que as análises físico-químicas e microbiológicas são fundamentais para a gestão adequada do lodo. Elas fornecem informações cruciais para o planejamento do tratamento, a fim de determinar o tipo e a necessidade dele para estabilizar o lodo e reduzir contaminantes a níveis seguros, contribuindo para a avaliação de riscos e identificação dos potenciais riscos. Dessa forma, há a garantia de que o uso do lodo não causará danos ambientais nem humanos (EPA, 2023).

Ressalta-se que a realização de análises físico-químicas e microbiológicas do lodo é indispensável para o seu manejo seguro e eficiente. Essas análises fornecem compreensão detalhada da composição e dos potenciais riscos do lodo, orientando estratégias de tratamento, reutilização e disposição final. Com gestão adequada, o lodo pode ser transformado de resíduo problemático em recurso valioso, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública (Monteiro, 2023).

No Brasil, a classificação do lodo é regulamentada pela Resolução CONAMA n.º 498/2020 (Brasil, 2020), que estabelece critérios e procedimentos para a produção e a aplicação do lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário em solos. Segundo essa resolução, o lodo é subdividido em duas classes principais: classe A e classe B (*ibid.*). O lodo de classe A possui níveis reduzidos de patógenos, resultantes de tratamentos avançados, como pasteurização, compostagem ou digestão termofílica. Esse lodo pode ser aplicado diretamente no solo, com restrições mínimas, desde que atenda aos padrões de qualidade estabelecidos para metais pesados e outros contaminantes.

Por outro lado, o lodo de classe B tem nível patógeno superior ao lodo de classe A e requer a adoção de processos de estabilização. Sua aplicação no solo é restrita e deve seguir critérios específicos de controle e monitoramento para prevenir riscos à saúde pública e ao meio ambiente. A aplicação do lodo de classe B é geralmente limitada a áreas não acessíveis ao público e com restrições quanto ao cultivo de alimentos para consumo humano (Brasil, 2020).

O estado de São Paulo, um dos mais populosos e industrializados do Brasil, enfrenta desafios significativos na gestão dos resíduos gerados por suas estações de tratamento de esgoto. Segundo autores, o volume de lodo gerado anualmente é substancial, totalizando cerca de 300 mil toneladas de matéria seca. Esse volume representa cerca de 25% do total de lodo gerado no país, refletindo a concentração populacional e a extensa rede de tratamento de esgoto presente no estado (Fischer, 2023).

A gestão desse volume considerável de lodo requer estratégias eficazes de tratamento, reutilização e disposição final. O tratamento do lodo inclui processos de estabilização, como digestão anaeróbia ou aeróbia, secagem, compostagem e incineração. A escolha do método de tratamento depende de fatores como a composição do lodo, os custos envolvidos e os requisitos de qualidade para sua reutilização ou disposição. Além disso, a CETESB implementa programas de monitoramento e controle para garantir que o manejo do lodo esteja em conformidade com as normas ambientais e de saúde pública, minimizando os impactos negativos sobre o meio ambiente e a sociedade (Fischer, 2023).

2.4. Normatização e legislação do tratamento de esgoto

A normatização e a legislação dos efluentes líquidos são fundamentais para garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública, estabelecendo diretrizes claras para o descarte adequado desses resíduos. No Brasil, essa regulamentação é guiada por diversas leis, decretos e resoluções que visam controlar a qualidade dos efluentes lançados no meio ambiente e orientar as práticas de tratamento.

Uma das principais legislações que regem os efluentes no Brasil é a Lei n.º 9.433/97, conhecida como a Lei das Águas, que estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos e define os instrumentos de gestão das águas no país (Brasil, 1997). Além disso, a Resolução CONAMA n.º 430/2011 é um marco importante, estabelecendo os padrões de qualidade para o lançamento de efluentes em corpos d'água receptores, bem como os critérios e as diretrizes para o licenciamento ambiental de sistemas de tratamento de efluentes (CONAMA, 2011).

A Resolução CONAMA n.º 357/2005 também é relevante, pois estabelece os padrões de qualidade da água para diversos usos, incluindo o lançamento de efluentes em corpos d'água superficiais (Brasil, 2005). Ademais, existem normas específicas para setores industriais, como a NBR 10.004, que trata do gerenciamento de resíduos sólidos industriais, e a NBR 12.208, que elenca diretrizes para o tratamento de efluentes líquidos industriais (ABNT, 2004).

Essas normas e legislações criam limites máximos de concentração para diversos parâmetros, como carga orgânica, sólidos suspensos, metais pesados e substâncias tóxicas, com o objetivo de proteger a qualidade das águas e dos ecossistemas aquáticos (Brasil, 2005). Também determinam os procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos que geram efluentes líquidos, exigindo a implantação de sistemas de tratamento adequados e a realização de monitoramento periódico da qualidade da água (CONAMA, 2011).

O descumprimento das normas e legislações relacionadas aos efluentes pode acarretar sanções administrativas, como multas e embargos, responsabilização civil e criminal dos responsáveis. Devido a isso, trabalhar em conformidade com a normativa é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico de forma responsável (CONAMA, 2011).

O Artigo 16 da Resolução CONAMA n.º 430/2011 estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos, fornecendo diretrizes essenciais para garantir a qualidade dos recursos hídricos e a preservação do meio ambiente (CONAMA, 2011). Essas disposições aplicam-se a todas as fontes poluidoras, sejam elas domésticas, industriais, agrícolas, hospitalares ou de qualquer outra origem.

Em relação às condições de lançamento de efluentes, o referido artigo considera diversos parâmetros a serem observados. O pH do efluente, por exemplo, deve estar dentro da faixa de 5 a 9, garantindo que o meio receptor não seja afetado por variações extremas de acidez ou alcalinidade (CONAMA, 2011), conforme descrito na Tabela 1. Além disso, a temperatura do efluente deve ser inferior a 40°C, com variação máxima de 3°C na zona de mistura do corpo receptor. Outro fator importante é o cumprimento dos limites para materiais sedimentáveis, óleos e graxas, e é exigida remoção mínima de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) de 60% (CONAMA, 2011).

Em relação aos padrões de lançamento de efluentes, este artigo apresenta valores máximos permitidos para diversos parâmetros inorgânicos e orgânicos, como arsênio total, chumbo total, cromo hexavalente, nitrogênio amoniacal total, benzeno, clorofórmio, entre

outros. Esses valores são parâmetros de referência para garantir que os efluentes não causem danos ao meio ambiente ou à saúde humana (CONAMA, 2011).

Tabela 1 — Valores de referência da normatização brasileira.

PARÂMETROS	NORMATIVA		
	CONAMA 430/11	Dec. 8.468/76	Valor de referência
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	....	60	%
Substâncias solúveis em hexano	....	100	mg L ⁻¹
Materiais sedimentáveis	1	1	mL L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	20	.....	mg L ⁻¹
pH	De 5 a 9	De 5 a 9	UpH
Temperatura da amostra	40°	40°	°C

Fonte: CONAMA (2011); Brasil (1976).

São previstas algumas disposições específicas para determinados tipos de efluentes. Por exemplo, os efluentes oriundos de sistemas de disposição final de resíduos sólidos devem atender às mesmas condições e padrões estabelecidos, enquanto os efluentes provenientes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários devem obedecer às normas específicas definidas na Seção III da Resolução CONAMA n.º 430/2011 (CONAMA, 2011).

Por sua vez, os efluentes oriundos de serviços de saúde estão sujeitos às exigências estabelecidas na Seção III da Resolução, desde que atendam às normas sanitárias específicas vigentes (CONAMA, 2011). Eles podem ser lançados em rede coletora de esgotos sanitários conectada à estação de tratamento, desde que atendam às normas e diretrizes da operadora do sistema, ou podem ser lançados diretamente após tratamento especial.

Em resumo, o Artigo 16 da Resolução CONAMA n.º 430/2011 aponta importantes condições e padrões para o lançamento de efluentes líquidos, contribuindo para a preservação da qualidade dos recursos hídricos e para a proteção do meio ambiente (CONAMA, 2011). Outra legislação a mencionar é o Decreto Federal n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976, que trata das condições e dos padrões para o lançamento de efluentes líquidos (Brasil, 1976). O Artigo 18 desse decreto define especificações adicionais que complementam as normas estabelecidas pela legislação ambiental.

De acordo com o Artigo 18 do Decreto n.º 8.468/1976, os efluentes líquidos provenientes de atividades industriais devem seguir certos requisitos para garantir a preservação do meio ambiente e da saúde pública (Brasil, 1976). Esses requisitos incluem a determinação de valores

máximos permitidos para diferentes parâmetros, tais como temperatura, pH, materiais sedimentáveis, substâncias tóxicas, entre outros (*ibid.*).

Além disso, o decreto apresenta diretrizes específicas para o monitoramento e controle da qualidade dos efluentes, exigindo que as indústrias realizem análises periódicas para garantir a conformidade com os padrões estabelecidos. Isso inclui a coleta de amostras representativas dos efluentes, a realização de análises laboratoriais e a manutenção de registros detalhados dos resultados obtidos (Brasil, 1976).

O Artigo 18 do Decreto n.º 8.468/1976 estabelece penalidades para as empresas que descumprirem as normas de lançamento de efluentes, incluindo multas e outras sanções administrativas. Essas penalidades têm o objetivo de incentivar a conformidade com a legislação ambiental e prevenir danos ao meio ambiente e à saúde pública (Brasil, 1976). Por conseguinte, a Resolução CONAMA n.º 430/2011 e o Decreto n.º 8.468/1976 desempenham papel fundamental na regulamentação do lançamento de efluentes líquidos no Brasil, garantindo que as atividades industriais e outras fontes poluidoras operem de forma responsável e sustentável (CONAMA, 2011; Brasil, 1976).

Entre os métodos para o cumprimento das normativas descritas anteriormente, o Método 5210 B (APHA, 2017) é considerado uma importante técnica laboratorial utilizada para a determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em águas residuais. Desenvolvido pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMWW), esse método é amplamente reconhecido e adotado em todo o mundo como ferramenta essencial para avaliar a qualidade da água e o grau de poluição orgânica de efluentes líquidos (APHA, 2017).

Em geral, o Método 5210 B (APHA, 2017) define um procedimento padronizado para a realização da análise da DBO, assegurando resultados precisos e consistentes. O processo envolve a preparação de amostras de água coletada em campo, a adição de nutrientes e microrganismos, e a incubação das amostras em condições controladas de temperatura e aeração por um período de cinco dias (APHA, 2017). Durante o período de incubação, os microrganismos presentes na amostra de água consomem a matéria orgânica, liberando dióxido de carbono e outros produtos de degradação. A quantidade de oxigênio consumida nesse processo é então medida por meio de titulação iodometria ou por métodos colorimétricos, fornecendo uma estimativa da DBO (APHA, 2017).

Assim, a 23^a edição do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (SMWW) inclui atualizações e aprimoramentos no Método 5210 B, explorando sua relevância

e aplicabilidade contínuas às necessidades atuais de análise de água e efluentes (APHA, 2017). Essas atualizações podem incluir modificações nos procedimentos de preparação de amostras, ajustes nos métodos de titulação e colorimetria, e recomendações para o controle de qualidade dos resultados obtidos (APHA, 2017).

Além do Método 5210 B, o SMWW também aborda outras técnicas de análise de água e efluentes, como o Método 5220, que se refere à determinação da concentração de oxigênio dissolvido (OD) em águas naturais e tratadas. O oxigênio dissolvido é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade da água e a capacidade de suporte de vida aquática em corpos d'água receptores (APHA, 2017). Em resumo, o Método 5210 B e outras técnicas descritas no SMWW são ferramentas essenciais para a avaliação da qualidade da água e dos efluentes líquidos. Elas permitem monitorar e controlar a poluição orgânica, garantindo a conformidade com os padrões ambientais e contribuindo para a preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente (APHA, 2017).

2.5. Cenário socioambiental e qualidade da água

O consumo de água no mundo tem aumentado mais do que o dobro da taxa de crescimento populacional no último século (ONU, 2021). Segundo dados da WorldMeters (2021), a taxa de crescimento populacional em 2020 foi de 1,05%. Esse aumento no consumo é impulsionado pelo crescimento populacional, pelo desenvolvimento socioeconômico e pelas mudanças nos padrões de consumo (Unwater, 2017). Trindade (2021) prevê que a demanda global por água continuará a crescer a uma taxa similar até 2050.

A água é um recurso imprescindível à saúde e à dignidade, e todos os aspectos da vida estão interligados por ela. Contudo, estima-se que existam aproximadamente 2 bilhões de indivíduos sem acesso à água tratada globalmente e/ou que residam em países com escassez hídrica, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022).

Segundo a OMS (2022), anualmente, aproximadamente 830 mil pessoas morrem devido a doenças diarreicas causadas pela escassez de água potável, pelo saneamento inadequado e pela falta de higiene adequada das mãos. Crianças com menos de cinco anos de idade são as mais impactadas. Anualmente, 297 mil vidas poderiam ser poupadadas por meio de sistemas de água e saneamento apropriados.

Contudo, a população mundial, em 2022, atingiu a marca de 8 bilhões de pessoas, e esse crescimento populacional, juntamente com os desenvolvimentos urbano e econômico, resultará

na geração e no aumento significativo da quantidade de resíduos sólidos, incluindo aqueles provenientes do tratamento de águas brutas e residuais (Cruz, 2023). Estima-se que a taxa global de produção de lodo de esgoto por ano seja de aproximadamente 45 milhões de toneladas em massa seca (Santos, 2023). Além disso, o lodo resultante do tratamento de água bruta também é gerado em volumes consideráveis, representando cerca de 1% a 3% do volume para cada litro de água tratada (Richter, 2021).

Grande parte desse crescimento será impulsionada pela agricultura, que atualmente utiliza cerca de 70% da água doce global. As indústrias são responsáveis por cerca de 19% do consumo, seguidas pelo uso doméstico, que representa 11% (Silva, 2024). A água é um recurso essencial para a vida humana, tanto para a saúde pública quanto para o bem-estar das comunidades. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), cada pessoa necessita, no mínimo, de 110 litros de água potável por dia para suprir suas necessidades, sendo que, no Brasil, esse consumo pode chegar a 200 litros por dia.

No Brasil, a água fornecida à população provém principalmente de sistemas de abastecimento público e poços artesianos. A qualidade dessa água e os impactos socioambientais das ETEs são temas de extrema importância, especialmente em regiões onde a infraestrutura sanitária é deficiente. Devido a isso, apenas 50,8% do esgoto gerado passa por tratamento adequado; Estima-se que aproximadamente 370 mil toneladas de matéria seca de lodo de ETEs sejam produzidas anualmente, com expectativa de aumento significativo (Brasil, 2022).

O lodo de ETEs, em sua maioria, é atualmente descartado em aterros sanitários sem qualquer tratamento adicional, o que representa um potencial contaminante para o solo (Bindá, 2022). A água fornecida pela rede pública de abastecimento é geralmente tratada e monitorada para garantir a potabilidade. No entanto, desafios como a contaminação por poluentes industriais, agrícolas e domésticos ainda persistem, comprometendo a qualidade da água em algumas regiões (ANA, 2017).

Por outro lado, os poços artesianos outorgados são uma alternativa em áreas rurais ou onde a rede pública é insuficiente. A perfuração e o uso desses poços requerem autorização específica para garantir que não haja sobre-exploração e contaminação do lençol freático. Estudos indicam que a gestão inadequada e a falta de fiscalização podem levar à contaminação da água subterrânea, impactando negativamente a saúde pública (Hirata *et al.*, 2015).

A contaminação do lençol freático pode ocorrer devido a várias fontes, incluindo

vazamentos de sistemas sépticos, resíduos industriais e uso excessivo de pesticidas e fertilizantes na agricultura. A água dos poços artesianos pode estar contaminada com nitratos, metais pesados e patógenos, representando um risco significativo à saúde (Montagna, 2017). Sendo assim, a verificação regular da qualidade da água desses poços é crucial para garantir que atendam aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação.

A contaminação da água subterrânea por ferro (Fe) e manganês (Mn) origina-se de diversas fontes, incluindo rejeitos e resíduos industriais, postos de gasolina, lixões e a presença de elementos químicos e tóxicos no subsolo (Cembranel *et al.*, 2019). Além disso, a mobilidade desses elementos é influenciada pelas propriedades físico-hídricas do solo, as quais são afetadas pelas características ambientais. No Brasil, a utilização das águas subterrâneas frequentemente ocorre de maneira empírica, improvisada e sem controle adequado, o que resulta em problemas recorrentes de interferências entre poços, diminuição dos fluxos de base dos rios, impactos em áreas alagadiças e redução das descargas de fontes e nascentes (Ferreira, 2009).

A contaminação do lençol freático pode ter consequências graves para o meio ambiente e a saúde humana. Poluentes como metais pesados, nitratos e produtos químicos industriais podem infiltrar-se no solo e alcançar as águas subterrâneas, tornando a água imprópria para consumo e irrigação. A contaminação acarreta a perda de biodiversidade, a degradação de ecossistemas aquáticos e a proliferação de doenças. A recuperação dessas áreas é um processo complexo e oneroso, exigindo intervenções técnicas e políticas de longo prazo (Hirata *et al.*, 2015).

Nesse contexto, as estações de tratamento de esgoto desempenham papel vital na proteção dos recursos hídricos e na promoção da saúde pública. No entanto, as comunidades localizadas no entorno dessas instalações frequentemente enfrentam desafios específicos. Por outro lado, as ETEs contribuem para a redução da poluição dos cursos d'água, melhorando a qualidade ambiental e proporcionando benefícios indiretos, como a valorização imobiliária e a redução de doenças de veiculação hídrica (Hirata *et al.*, 2015).

O cenário socioterritorial das comunidades no entorno das ETEs é caracterizado por uma complexa interação entre aspectos sociais, econômicos e ambientais. Muitas vezes, essas comunidades são formadas por populações de baixa renda, que vivem em áreas periféricas e sofrem com a falta de infraestrutura básica. A presença das ETEs pode mitigar ou agravar essas condições, dependendo da gestão e da operação das estações.

Os impactos socioambientais das estações de tratamento de esgoto apresentam

características positivas e negativas. Positivamente, as ETEs contribuem para a despoluição dos rios e lagos, a melhoria da saúde pública e a recuperação de ecossistemas aquáticos. Essas instalações são fundamentais para o cumprimento das diretrizes da Política Nacional de Saneamento Básico, que visa à universalização do acesso ao saneamento (Brasil, 2007).

Apesar da significativa importância do tratamento de esgotos, tanto sanitários quanto industriais, na cadeia de saneamento, as ETEs tornam-se geradoras de poluição. Essas estações consomem grandes quantidades de água e energia, produzem despejos líquidos, liberam diversos gases nocivos à atmosfera e geram resíduos sólidos de difícil tratamento e disposição. Em decorrência desses fatores, as ETEs apresentam um grave problema ambiental, tendo o potencial de impactar negativamente o ar, a água e o solo (Santos, 2023).

A ocorrência de odores no entorno das ETEs tem impacto significativo na população do território, principalmente devido à emissão de gás sulfídrico, o principal poluente odorífero dessas estações (Borges, 2016). Esse problema resulta em frequentes reclamações dos moradores locais e apresenta riscos potenciais aos operadores das ETEs, dada a alta toxicidade do gás. A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA, 2023) destaca que o gás sulfídrico pode causar diversas formas de toxicidade em humanos, afetando a visão, o olfato e o tato. Concentrações superiores a 10 ppm podem ocasionar danos à saúde a curto, médio e longo prazo.

Além disso, a emissão desses odores afeta negativamente os ecossistemas vegetal e animal (Nicell, 2009). Conforme Gebicki, Byliński e Namieśnik (2016), o nível de emissão desses compostos varia consideravelmente, dependendo da qualidade do esgoto, da taxa de alterações biológicas no esgoto coletado e das tecnologias utilizadas nas ETEs.

De acordo com Ludovice (1997), os principais subprodutos que geram a emissão de odores pertencem às famílias de compostos químicos, como os derivados de enxofre (H_2S , mercaptanas e outros polienxofres), nitrogênio (NH_3 , aminas cíclicas clássicas), fenóis, aldeídos, cetonas, álcoois e ácidos graxos voláteis. Esse fenômeno é oriundo da decomposição de águas residuais ricas em aminoácidos, lipídeos e polissacarídeos. Os compostos de enxofre constituem a maioria das moléculas odoríferas encontradas nas estações de tratamento, especialmente o gás sulfídrico. Outros compostos contendo nitrogênio, como a amônia (NH_3), as aminas clássicas, o indol e o escatol, provenientes da degradação da urina, proteínas e aminoácidos, são importantes moléculas responsáveis pela geração de odores (Castanheira; Baydum, 2015).

Com efeito, tais fatores devem ser considerados, sobretudo pelos governos locais, que

precisam demonstrar à população a relação de custo-benefício da construção de uma ETE. Para minimizar seus efeitos, é preciso criar um projeto que possua um componente arquitetônico que possibilite a integração da paisagem com a urbanização local (Castanheira; Baydum, 2015).

A gestão da qualidade da água e os impactos das estações de tratamento de esgoto são temas centrais para a sustentabilidade ambiental e a saúde das comunidades. A implementação rigorosa das regulamentações, a fiscalização contínua e a conscientização pública são essenciais para garantir que os recursos hídricos sejam utilizados de forma sustentável e segura. A integração de políticas de saneamento com estratégias de conservação ambiental e desenvolvimento comunitário tende a promover um cenário mais equilibrado e benéfico para todos os envolvidos (Castanheira; Baydum, 2015).

REFERÊNCIAS

- ABREU JÚNIOR, C. H. Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 391-470, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASesGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.
- AISSE, M. M. Sustentabilidade no tratamento de esgoto: desafios e avanços. In: **DIÁLOGOS DO SANEAMENTO COM O TEMA “NOVOS DESAFIOS PARA O SETOR DE SANEAMENTO: MODELOS DE CONTRATO E ALTERNATIVAS NO TRATAMENTO DE ESGOTO”**, 8., 2019, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-RS (ABES), 2019. p. 60. Disponível em: https://www.abes-rs.org.br/novo/_materiais/materiais_hckcchahhkb3.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.
- ALMEIDA, R.; CAMPOS, J. C. Análise tecnoeconômica do tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista Ineana**, v. 8, n. 1, p. 6-27, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342110815_Analise_tecnoeconomica_do_tratamento_de_lixiviado_de_aterro_sanitario. Acesso em: 15 maio 2024.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: APHA, 2017.
- ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodo de esgotos — tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004: resíduos sólidos — classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em:

<https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9648**: estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. Disponível em: https://allevanteducacao.com.br/wp-content/uploads/Cursos/%5BDEFINITIVO%5D%20SISTEMAS%20DE%20ESGOTO%20SANIT%C3%81RIO%20M%C3%93DULO%202/NBR_9648_Estudos_de_Concepcao_de_Sistema.pdf. Acesso em: 15 maio 2024.

BEZERRA, K. M. **Caracterização do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário da região metropolitana de Fortaleza visando sua utilização na agricultura**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BINDÁ, S. M. **Caracterização do lodo bruto da ETE-Maratoan de Crateús-CE e tratamento a partir da compostagem para fertilização de solos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/68875>. Acesso em: 15 maio 2024.

BORGES, K. O. **Estudo do monitoramento dos impactos pós-implantação do aterro sanitário de Uberlândia/MG**. 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

BRAGA, D. S. *et al.* Tratamento de efluentes: sistemas convencionais e avançados, desafios e perspectivas para a sustentabilidade. **Ciências e Tecnologia das Águas: Inovações e Avanços em Pesquisa**, Guarujá, v. 1, p. 306-319, 2023. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/230312599.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 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. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, edição 161, p. 265-269, 21 ago. 2020. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=726. Acesso em: 8 maio 2024.

BRASIL. Decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre o regulamento para o controle da poluição causada por lançamento de efluentes líquidos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 11867-11869, 09 set. 1976. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>.

Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 470-474, 9 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 8 jan. 2007. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=08/01/2007&jornal=1&pagina=3&totalArquivos=64>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, v. 3, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 5 maio 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **CataloSan**: catálogo de soluções sustentáveis de saneamento — gestão de efluentes domésticos. Campo Grande: UFMS, 2018. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/estudos-e-pesquisas/-asset_publisher/qGiy9skHw4ar/content/catalosan-catalogo-de-solucoes-sustentaveis-de-saneamento. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Brasília, DF: SNIS, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snис>. Acesso em: 21 jan. 2024.

BRK AMBIENTAL. **Modelo ilustrativo para construção — Procedimentos para a ligação adequada da rede de esgoto**. São Paulo: BRK Ambiental, 2023. Disponível em: <https://www.brkambiental.com.br/uploads/4/25-folheteria/brk-folheteria-02-tratamento-esgoto-site.pdf>. Acesso em: 3 maio 2023.

CASTANHEIRA, J. P. A.; BAYDUM, V. P. A. Percepção dos impactos socioambientais da estação de tratamento de esgotos (ETE) relatados pelos moradores do Residencial Olho d'Água, Jaboatão dos Guararapes, PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 3, p. 881–892, 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232709>. Acesso em: 15 maio 2024.

CECHETTI, R. **Uso de resíduo sólido de lodo de esgoto no cultivo de beterraba (*Beta vulgaris esculenta*) e alface (*Lactuca sativa*)**. 2022. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2022. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/6647>. Acesso em: 15 maio 2024.

CEMBRANEL, A. S. *et al.* Impactos de indústria metalomecânica e a qualidade da água

subterrânea: estudo de caso. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 4, p. 441-455, 2019. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29610>. Acesso em: 15 maio 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n.º 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente — CONAMA. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, 16 maio 2011. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/245-resolucao/185-conama-n-430-de-2011?layout=publicacoes>. Acesso em: 15 maio 2024.

CONTARINI, L. da C. *et al.* Uso de processos biotecnológicos no tratamento de resíduos domésticos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 24052-24061, 2022. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/w4mszeycpfnbh2yqkkugxbhnq/access/wayback/https://www.brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/download/46071/pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

COSTA, C. H. da. **Estudo ecotoxicológico para valorização do resíduo produzido no processo de polimento de piso porcelanato na indústria cerâmica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94445>. Acesso em: 15 maio 2024.

CRUZ, C. C. B. da S. **Efeito da adição de resíduo de malte da indústria cervejeira no processo de compostagem**. 2023. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2023. Disponível em: <https://tede.unicentro.br/jspui/bitstream/jspui/2195/2/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-20%20Carlos%20Casturino%20Bueno%20da%20Silva%20Cruz.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

ESPERANCINI, M. S. T.; BARBOSA, F. S. Análise econômica da produção de lodo de esgoto compostado para fins agrícolas na estação de tratamento de esgoto de Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 36, n. 2, p. 218-229, 2021. Disponível em: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/4214>. Acesso em: 9 jan. 2024.

FERREIRA, F. A. **Recursos hídricos e desenvolvimento: análise das condições de oferta de água subterrânea ao setor industrial de Criciúma (SC)**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/2280>. Acesso em: 15 maio 2024.

FERNANDES, A. P. S.; CASIMIRO, L. M. S. M. de. Políticas de desenvolvimento da infraestrutura para o saneamento básico no Brasil: empecilhos à execução das metas e limitação do acesso ao bem público. **Revista de Direito Administrativo e Infraestrutura**, Belo Horizonte, v. 6, n. 21, p. 25-49, 2022. Disponível em: <https://rdai.com.br/index.php/rdai/article/view/fernandes2022>. Acesso em: 15 maio 2024.

FISCHER, F. N. **Avaliação e monitoramento operacional em sistema descentralizado de tratamento de esgoto no lote**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253231>. Acesso em: 15 maio 2024.

GEBICKI, J.; BYLIŃSKI, H.; NAMIEŚNIK, J. Measurement techniques for assessing the olfactory impact of municipal sewage treatment plants. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, n. 1, p. 1-15, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-5024-2>. Acesso em: 15 maio 2024.

GUBEL, A. J. M. **Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo proveniente das estações de tratamento de águas residuais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/255799>. Acesso em: 15 maio 2024.

HIRATA, D. *et al.* O uso de informações patentárias para a valorização de resíduos industriais: o caso do lodo de tratamento de esgoto doméstico. **Revista de Ciências da Administração**, Florianópolis, v. 17, n. 43, p. 55-71, 2015. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2735/273543309005.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LIMA, I. C. A. **Efluentes hospitalares e sua relação com as estações de tratamento de esgoto com ênfase na composição microbiológica**. 2023. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas (IBILCE), São José do Rio Preto, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/246479>. Acesso em: 15 maio 2024.

LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1997. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/124215>. Acesso em: 15 maio 2024.

MANGELLI, L. N. R. **Estudo de poluentes orgânicos por GCXGC/TOFMS em lodo gerado em ETA por coagulação convencional e a utilização de um biopolímero à base de tanino**. 2023. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/20027>. Acesso em: 15 maio 2024.

MONTAGNA, T. B. **Levantamento e análise de técnicas para disposição e tratamento de dejetos de suínos e de aves em estabelecimentos rurais familiares**. 2017. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, 2017. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/2986>. Acesso em: 15 maio 2024.

MONTEIRO, K. A. **Remoção de toxicidade de esgotos secundários com carvão ativado produzido de lodo biológico industrial**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)

— Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. Disponível em:
<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/31054/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

NICELL, J. A. Assessment and regulation of odour impacts. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 1, p. 196-206, 2009. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008008996>. Acesso em: 15 maio 2024.

NKANSAH, M. A. *et al.* Characterization of beauty salon wastewater from Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana, and its surrounding communities. **Environmental Health Insights**, v. 10, n. 1, p. 147-154, 2016. Disponível em:
<https://bioone.org/journals/environmental-health-insights/volume-10/issue-1>. Acesso em: 15 maio 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Agências da ONU lançam relatório mundial sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos**. Brasília, DF, 24 mar. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/123077-ag%C3%A3ncias-da-onu-lan%C3%A7am-relat%C3%B3rio-mundial-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-h%C3%A3%C3%ADdricos>. Acesso em: 1 ago. 2024.

OSUOLALE, O.; OKOH, A. I. Human enteric bacteria and viruses in five wastewater treatment plants in the Eastern Cape, South Africa. **Journal of Infection and Public Health**, v. 10, n. 5, p. 541-547, 2017. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876034117300242>. Acesso em: 15 maio 2024.

PAES, A. F. O saneamento básico como fator preponderante na saúde pública das comunidades. **RCMOS — Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 2, n. 2, p. 261-267, 2022. Disponível em:
<https://submissoesrevistacientificaosaber.com/index.php/rcmos/article/view/296>. Acesso em: 15 maio 2024.

PEREIRA, J. S. *et al.* Potencial de uso agrícola de bioassólido oriundo de estação de tratamento de esgoto. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 16, n. 4, p. 1-16, 2023. Disponível em:
<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/11698>. Acesso em: 15 maio 2024.

REIS, J. C. M. dos; ROSAS, R. O. A proteção das águas subterrâneas como fonte de resiliência e ferramenta de redução de risco de desastres no município de Maricá-RJ. **Revista Ibero-Americana de Hum., Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 328-342, 2022. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4579>. Acesso em: 15 maio 2024.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2021.

SALGOT, M.; FOLCH, M. Wastewater treatment and water reuse. **Current Opinion in**

Environmental Science & Health, v. 2, p. 64-74, 2018. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584417300314>. Acesso em: 15 maio 2024.

SANTOS, R. A. dos. **Biodegradação de lodo de ETA e ETE avaliada mediante ensaios de toxicidade e caracterização microbiológica**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/0c57d4e8-2f2d-4578-878b-dac2dc2a567c>. Acesso em: 15 maio 2024.

SILVA, F. F. R. **Análise da eficiência do tratamento de água em poços artesianos para o abastecimento público e consumo humano em escolas rurais do município de Uberlândia**. 2024. 126 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/44593>. Acesso em: 15 maio 2024.

SILVA, L. de O. Uso de biodigestores em estação de tratamento de esgoto. **Uniciências**, Campo Grande, v. 28, n. 1, p. 25-31, 2024.

SILVA, S. S. **Aplicação de radiação UV para desinfecção de efluente da associação de reator UASB e biofiltro aerado submerso**. 2017. Dissertação (Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

TRINDADE, K. A. **Aproveitamento de água da chuva para fins não potáveis em unidade de ensino público federal no município de Lagarto/SE**. 2021. Dissertação (Pós-graduação em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES)**. Washington: EPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 9 jan. 2025.

UNWATER. **UN World Water Development Report 2017**. [S. l.], 22 mar. 2017. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2017>. Acesso em: 20 ago. 2023.

VIEIRA, G. M. **Desenvolvimento de ferramenta para a simulação de biodigestão anaeróbia de RSU**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/19553>. Acesso em: 15 maio 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.

WORLDMETERS. **Current World Population**. 2021. Disponível em: <https://www.worldometers.info/world-population/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

CAPÍTULO 3 — CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTE DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS¹

RESUMO

O crescimento populacional e industrial próximo a corpos hídricos aumenta os riscos de contaminação por descarte inadequado de resíduos sólidos e despejo de águas residuais, podendo prejudicar a saúde pública e corpos d'água. Demandas socioambientais, tais como qualidade dos corpos hídricos, poluentes e parâmetros físico-químicos, preocupam a sociedade e a gestão municipal. Nesse contexto, esta pesquisa, realizada de março de 2023 a fevereiro de 2025, objetivou analisar e caracterizar o efluente das estações de tratamento de esgoto (ETEs) do município de Bebedouro/SP, considerando variações espaciais e temporais. Para tanto, as ETEs foram divididas em dois subgrupos: o subgrupo 1 englobou as ETEs de Botafogo e Turvínia; o subgrupo 2, as ETEs urbanas de São Carlos, Pedro Paschoal e Jardim Itália. Foi realizada análise físico-química dos parâmetros de demanda bioquímica de oxigênio total (DBO), substância solúvel em hexano, materiais sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio orgânico, nitrogênio total, nitrato, demanda química de oxigênio total (DQO), pH, temperatura e oxigênio dissolvido, seguindo as normas CONAMA 430/11 e o Decreto 8.468/1976. O intuito foi identificar os parâmetros fora do limite estabelecido pela legislação, indicando possíveis lançamentos inadequados de esgoto e descarte impróprio de resíduos sólidos, fatores que comprometem a qualidade dos corpos hídricos. Para esse fim, foram coletadas amostras em 2023 e 2024, nas entradas e saídas das ETEs rurais e urbanas. Na saída das ETEs urbanas (2023–2024), parâmetros como pH (7,0–7,35), oxigênio dissolvido (2,93–4,05 mg L⁻¹), nitrogênio total (5,3–46,5 mg L⁻¹) e DBO (4–10 mg L⁻¹) excederam os limites da Resolução CONAMA n.º 430/2011, indicando influência de despejos domésticos e industriais nos efluentes finais. Por conseguinte, recomendam-se melhorias e mudanças significativas à comunidade local a fim de enfrentar os problemas urgentes identificados e implementar ações para a preservação e proteção dos corpos hídricos.

Palavras-chave: Monitoramento; Recursos hídricos; Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

Population and industrial growth near water bodies increase the risk of contamination due to improper disposal of solid waste and discharge of wastewater, which can harm public health and water bodies. Socio-environmental concerns, such as water quality, pollutants, and physical-chemical parameters, are of increasing importance to society and municipal management. In this context, this research, carried out from March 2023 to March 2025, aimed to analyze and characterize the effluent from the wastewater treatment plants (WWTPs) in the municipality of Bebedouro/SP, considering spacial and temporal variations. The WWTPs were divided into two subgroups: subgroup 1 included Botafogo and Turvínia plants; subgroup 2, São Carlos, Pedro Paschoal, and Italia urban plants. Physical-chemical analysis were performed to assess parameters including: total biochemical oxygen demand (BOD), hexane-soluble materials, sedimentary materials, total phosphorus, ammoniacal nitrogen, Kjeldahl nitrogen, nitrate, nitrite, organic nitrogen, and total nitrogen, total chemical oxygen demand (COD), pH, temperature, and dissolved oxygen, following the guidelines of CONAMA 430/11 and Decree 8.468/1976. The objective was to identify parameters outside the limits set by legislation, indicating possible inadequate sewage discharge and improper disposal of solid waste, factors that compromise the quality of water bodies. To this end, samples were collected in 2023 and 2024 from the inlets and outlets of rural and urban WWTPs. At the outlets of the urban WWTPs (2023–2024), parameters such as pH (7.0–7.35), dissolved oxygen (2.93–4.05 mg L⁻¹), total nitrogen (5.3–46.5 mg L⁻¹), and BOD (4–10 mg L⁻¹) exceeded the limits set by CONAMA Resolution 430/2011, indicating the influence of domestic and industrial discharges on the final effluents. Consequently, significant improvements and changes are recommended for the local community to address the urgent problems identified and implement actions for the preservation and protection of water bodies.

¹ Capítulo 3 — Formatação de acordo com as normas da revista **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, 2025, ISSN: 2238-8869, DOI: 10.22166/2238-8869, Qualis Periódicos – CAPES: A4.

Keywords: wastewater treatment; water resources; monitoring.

3.1. Introdução

Atualmente, o desenvolvimento industrial descontrolado tem promovido um aumento significativo no consumo de água. Com isso, o crescimento do uso de produtos químicos e, consequentemente, a elevação no volume de resíduos ocorrem. De acordo com Souza e Gomes (2020), a geração das várias formas de resíduos provenientes das atividades domésticas, industriais e comerciais pode exercer influência significativa na qualidade dos corpos hídricos.

Os prejuízos encontrados nesses corpos hídricos refletem um problema ambiental exacerbado na atualidade (Shukla; Vaghela; Jain, 2017). Esse fato pode ser proveniente do descarte inadequado de resíduos sólidos, do lançamento de esgoto sanitário pelas indústrias, além da contribuição da sociedade nesse processo de contaminação e degradação ambiental (Araújo Júnior, 2020; Santos *et al.*, 2018).

A qualidade inadequada da água provoca a diminuição ou perda da biodiversidade aquática, modificações físico-químicas no ambiente e danos à saúde das comunidades (Garrison, 2012). No Brasil, a Resolução CONAMA n.º 430/2011 estabelece condições, parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes em corpos de água (CONAMA, 2011), apresentando os limites permitidos dos parâmetros físicos e químicos do efluente, como pH e demanda química de oxigênio (DQO). Diante disso, observa-se a importância do tratamento de efluentes, visando ao cumprimento da normativa vigente (Azevedo; Oliveira; Cavalcanti, 2020).

Para tanto, o monitoramento das características físicas, químicas e biológicas de corpos hídricos contribui para a avaliação da qualidade ambiental do ecossistema (Silva; Araújo, 2017). A supervisão das variáveis indicadoras da qualidade da água avalia os possíveis padrões de modificações ao longo dos locais e anos monitorados, além de fornecer informações essenciais para a compreensão dos corpos hídricos e para identificar quais parâmetros se encontram fora do limite estabelecido pela legislação (Karydis; Kitsiou, 2013; Cadorin *et al.*, 2023).

Nesse contexto, tem-se como objetivo deste trabalho analisar e caracterizar o efluente das estações de tratamento de esgoto do município de Bebedouro/SP, considerando as variações espaciais e temporais. A identificação dos efluentes surge como solução para assegurar a

conformidade com as leis ambientais e para direcionar o avanço de tecnologias e métodos de tratamento mais eficazes e sustentáveis. Ademais, serve para a verificação da qualidade da água em rios e lagos próximos aos pontos de descarte (Braga *et al.*, 2023).

3.2. Material e Métodos

A pesquisa foi desenvolvida no município de Bebedouro, localizado no estado de São Paulo. Bebedouro possui área territorial de 683.192 km², densidade demográfica de 111,79 habitantes por km² e população estimada de 76.373 habitantes em 2022 (IBGE, 2022). Para a realização do estudo, foi firmada parceria com o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Bebedouro (SAAEB Ambiental), possibilitando a atuação nas estações de tratamento de esgoto.

As estações de tratamento de esgoto foram divididas em dois subgrupos, sendo: **subgrupo 1** — ETEs distritais: ETE Botafogo e ETE Turvária; **subgrupo 2** — ETEs urbanas: ETE São Carlos, ETE Pedro Paschoal e ETE Jardim Itália; nova estação de tratamento de esgoto: ETE Bebedouro (em fase de construção), conforme apresentado na Figura 4 abaixo:

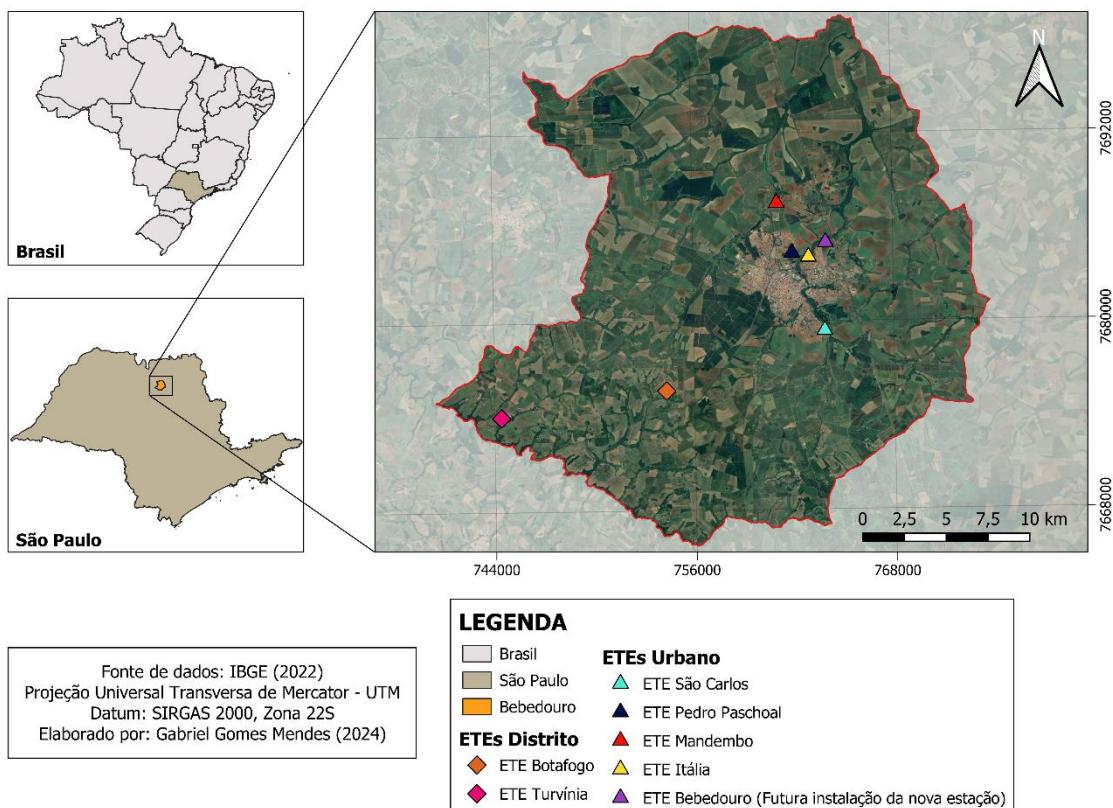


Figura 4 — Mapa de localização do município e das estações de tratamento de esgoto de Bebedouro/SP. **Fonte:** elaborada pela autora.

A divisão das ETEs em subgrupos propiciou a realização das análises por áreas, urbana e rural, possibilitando averiguar de qual área foi proveniente os materiais contamintantes.

3.2.1. Fluxograma do efluente da estação de tratamento de esgoto

Inicialmente, o processo de tratamento do efluente (PTE) faz-se necessário para eliminar a matéria orgânica. Após a separação, o fluido é destinado ao córrego, e o sólido, ao leito de secagem. O presente estudo foi fundamentado em pesquisa de campo, que, segundo Marconi e Lakatos (2017, p. 124), baseia-se “em geral, no levantamento de dados no próprio local onde os fenômenos ocorrem”. Esse tipo de documentação pode ocorrer por meio de pesquisa de campo ou de pesquisa de laboratório. Para este estudo, foi aplicada a pesquisa do tipo quantitativo-descritiva.

O PTE tem início com a entrada no gradeamento, onde acontece a seleção dos resíduos grosseiros em três etapas. O gradeamento possui três níveis de grade de diferentes espaçamentos para a seleção dos resíduos, conforme o nível de abertura. Em sequência, após a retenção dos sólidos no gradeamento, o efluente é direcionado para o peneiramento estático, com três vassourinhas giratórias. Após isso, encaminha-se para a caixa de areia, que tem a função de retirar a areia e partículas menores que passaram pela fase do gradeamento. A próxima etapa é a calha Parshall para a medição da vazão, que é de 1,48 litro por segundo.

Após o pré-tratamento (gradeamento e caixa de areia), o efluente chega à estação elevatória para o tratamento biológico (reatores biológicos, sendo o primeiro deles o reator anaeróbio de fluxo ascendente UASB, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), com tempo de detenção hidráulica (TDH) entre cinco e oito horas. Logo após, segue para o reator aeróbio. Após esse processo, o efluente permanece no processo de tratamento no decantador secundário e, depois, direciona-se para o tanque de desinfecção. Por fim, chega ao emissário para lançamento no córrego (Figura 5).

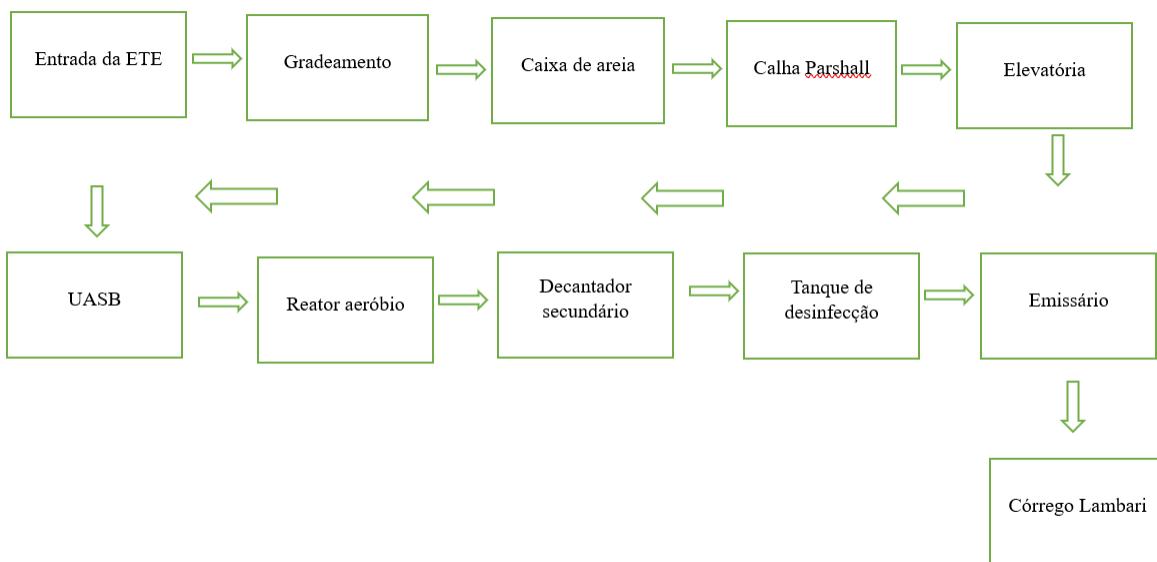


Figura 5 — Fluxograma do efluente da estação de tratamento de esgoto. **Fonte:** elaborada pela autora

As coletas das amostras dos efluentes foram realizadas na entrada e saídas das ETEs Botafogo (distrito), Turvária (distrito), São Carlos (urbana), Pedro Paschoal (urbana) e Jardim Itália (urbana). A primeira etapa aconteceu no período sem chuva, em novembro de 2023, e a segunda etapa foi efetuada no período chuvoso, em janeiro de 2024. Ambas as etapas foram executadas nas áreas rural (distritos) e urbana. Nas entradas e saídas das ETEs distritais (ETE Botafogo e ETE Turvária) e das ETEs urbanas (ETE Pedro Paschoal e ETE Jardim Itália), três amostras foram coletadas e encaminhadas ao laboratório de Controle Analítico do município de Osasco/SP.

Conforme a legislação, seguem os parâmetros analisados: demanda bioquímica de oxigênio total (DBO), substância solúvel em hexano, materiais sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio orgânico, nitrogênio total, nitrato, nitrito, demanda química de oxigênio total (DQO), pH, temperatura da amostragem e oxigênio dissolvido. Tal investigação dos efluentes foi efetuada de acordo com a normativa do CONAMA n.º 430/2011, Art. 16, e o Dec. n.º 8.468/1976, Art. 18 (Brasil, 1976).

A metodologia da coleta e da análise respeitou as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a NBR 9898/1987, de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW), 23^a edição (APHA, 2017), de 2017, o método 1060, o método 9060, POPs 036, 074, 108, 109, 234 e 239. As análises foram baseadas nestas referências: SMWW

(23^a edição de 2017), método 5210 B; método 5220 D; método 2540 F; método 2550 B; método 4500-NH3; método 4500-Norg C; método 4500-N; método 4500-H+; método 4500-O G.

Os resultados obtidos passaram por avaliação e análise de variância, enquanto os dados qualitativos foram avaliados por meio do teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2003).

3.3. Resultados

3.3.1. Estação de tratamento de esgoto — distrito de Turvínia, zona rural

A análise da tabela comparativa para os anos de 2023 e 2024, levando em consideração os valores máximos permitidos pelas legislações, revela pontos críticos relacionados aos resultados e às incertezas de medição dos parâmetros avaliados na estação de tratamento de esgoto do distrito de Turvínia, zona rural.

A coleta revelou variações notáveis nos parâmetros de qualidade da água entre os anos de 2023 e 2024. Destaca-se a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) no afluente (entrada), que registrou uma concentração de 468 mg/L em 2023, valor que diminuiu para 86 mg/L em 2024 (Figura 6). Embora represente uma redução, ambas as concentrações de DBO no afluente foram significativamente superiores ao limite de 60 mg/L estipulado pela legislação vigente, indicando uma elevada carga orgânica direcionada ao tratamento em ambos os períodos.

Houve um avanço positivo de 2023 para 2024, com melhorias nos processos de tratamento de efluentes. Entretanto, ainda há margem para otimizar o controle de parâmetros como DQO e fósforo total, especialmente para alinhar-se aos padrões internacionais mais rigorosos. Os valores de entrada apresentam tendência de redução de 2023 para 2024 em relação à maioria dos parâmetros analisados. Essa redução, ilustrada na Figura 6, indica uma melhora no controle de poluição antes do tratamento, o que é positivo.

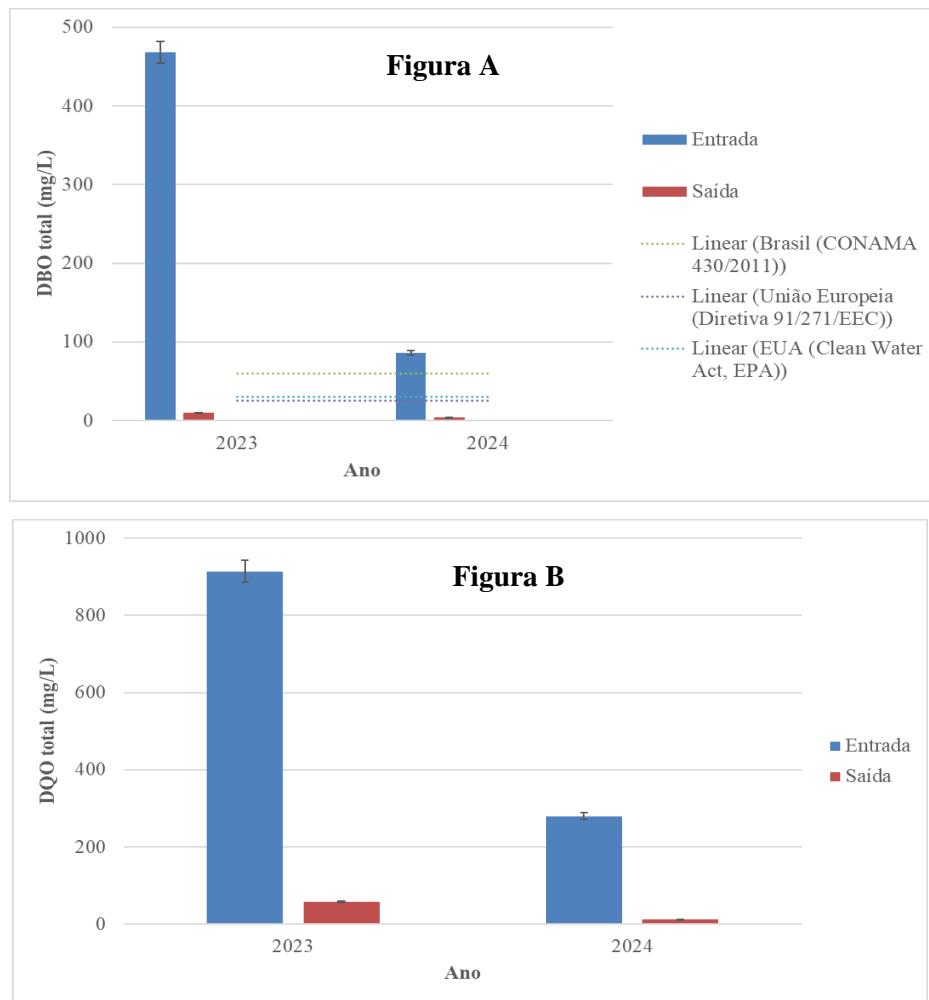


Figura 6 — (A) Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e (B) demanda química de oxigênio (DQO), na entrada e saída, nos anos de 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

No que tange ao afluente, a carga de DBO, embora reduzida em 2024 (86 mg L^{-1}), permaneceu acima do limite regulatório (60 mg L^{-1}), o que sugere uma sobrecarga contínua ao sistema de tratamento. De forma similar, as concentrações de demanda química de oxigênio (DQO) no afluente diminuíram de 914 mg L^{-1} (2023) para 280 mg L^{-1} (2024), mas o valor de 2024 ainda se manteve elevado em comparação ao padrão de referência da União Europeia (125 mg L^{-1}). Quanto ao nitrogênio total, os valores de entrada também superaram os limites internacionais ($10\text{--}20 \text{ mg L}^{-1}$) em ambos os anos, com $65,8 \text{ mg L}^{-1}$ (2023) e $46,5 \text{ mg L}^{-1}$ (2024).

Em contrapartida, a análise do efluente (saída) evidencia a eficiência do tratamento, com melhorias progressivas nos anos. No caso da DBO, as concentrações de saída de 10 mg L^{-1} (2023) e 4 mg L^{-1} (2024) atenderam com folga às legislações brasileira, europeia e norte-

americana (limite de 30 mg L^{-1}). Adicionalmente, a redução geral nos valores de incerteza de medição de 2023 para 2024 pode indicar um aprimoramento nos procedimentos analíticos ou na calibração dos equipamentos. Valores de incerteza iguais a zero, observados em parâmetros como nitrito e temperatura, sugerem que as concentrações estavam no limite de quantificação do método analítico utilizado.

Considerando a eficiência do tratamento, em 2024 os valores de saída estavam consistentemente próximos dos limites regulamentares. Esse fato reflete a melhoria geral no sistema de tratamento de efluentes. Os parâmetros da DBO e do nitrogênio total evidenciaram uma redução significativa, com melhorias expressivas de 2023 para 2024. Todavia, a DQO, apesar de apresentar redução nos valores de entrada e saída, ainda enfrenta desafios para atingir padrões internacionais mais rigorosos.

Ao relacionar os resultados aos impactos na vida aquática, percebe-se que a diminuição das concentrações de DBO pode reduzir os impactos negativos, como a eutrofização e a morte de organismos aquáticos. Nesse contexto, a comunidade ao redor dessas localidades nota a diferença quando há menores concentrações de poluentes nos corpos receptores; essa situação minimiza riscos à saúde humana e melhora a qualidade de vida dessa população. Em 2023, a diminuição da DBO e da DQO no tratamento de efluentes foi um indicativo da eficiência do processo de purificação da água.

As concentrações médias das substâncias solúveis em hexano encontradas na entrada e saída da estação de tratamento variam de $50,3$ a 5 mg L^{-1} , abaixo do limite permitido (Tabela 2). Esse fato demonstra que a ETE Turvínia remove eficazmente substâncias oleosas, o que contribui para a redução de toxinas e evita a formação de película na superfície dos corpos d'água, prejudicial à troca de gases.

A quantidade de materiais sedimentáveis encontrada na entrada e saída da estação de tratamento variou de $0,05$ a $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ e esteve abaixo do limite permitido (1 mg L^{-1}) pela legislação brasileira. Esse resultado auxilia na prevenção do assoreamento dos corpos d'água, dado que essa remoção é essencial para a sustentabilidade dos habitats aquáticos. Na análise do fósforo total, houve a variação de $2,902$ a $0,68$ na entrada e saída da ETE. Apesar de a legislação não estabelecer um limite, a redução significativa é positiva, pois o fósforo pode ser responsável pela eutrofização, causando proliferação de algas.

As concentrações médias do nitrogênio amoniacal encontradas na entrada e saída da estação de tratamento variaram de $16,94$ a $0,82 \text{ mg L}^{-1}$; estiveram abaixo do limite permitido

(20 mg L⁻¹) pela legislação brasileira, indicando boa remoção e, consequentemente, menor toxicidade para a vida aquática. As medições de nitrogênio total encontradas na entrada e saída da estação de tratamento variaram de 46,5 a 5,3 mg L⁻¹, revelando uma redução notável.

Tabela 2 — Concentração de substâncias solúveis em hexano, materiais sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total, nitrito, nitrato, pH e oxigênio dissolvido, na entrada e saída do tratamento, em comparação aos anos de 2023 e 2024 para a estação Turvínia (distrito), considerando o Dec. n.º 8.468/76 e a Resolução CONAMA n.º 430/11

NORMATIVA

PARÂMETROS	ENTRADA/S AÍDA	DEC. 8.468/76 - CONAMA N.º 430/11	VALOR DE REFERÊNCIA
Substâncias solúveis em hexano	50,3/5	100	mg L ⁻¹
Materiais sedimentáveis	0,05/0,1	1	mg L ⁻¹
Fósforo total	2,902/0,68	.....	mg L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	16,94/0,82	20	mg L ⁻¹
Nitrogênio total	46,5/5,3	.....	mg L ⁻¹
Nitrito	0,005/0,33	.....	mg L ⁻¹
Nitrato	114,9/10,2	.....	mg L ⁻¹
pH	7,35/7,0	5 a 9	UpH
Oxigênio dissolvido	2,93/4,05	.....	mg L ⁻¹

Fonte: elaborada pela autora.

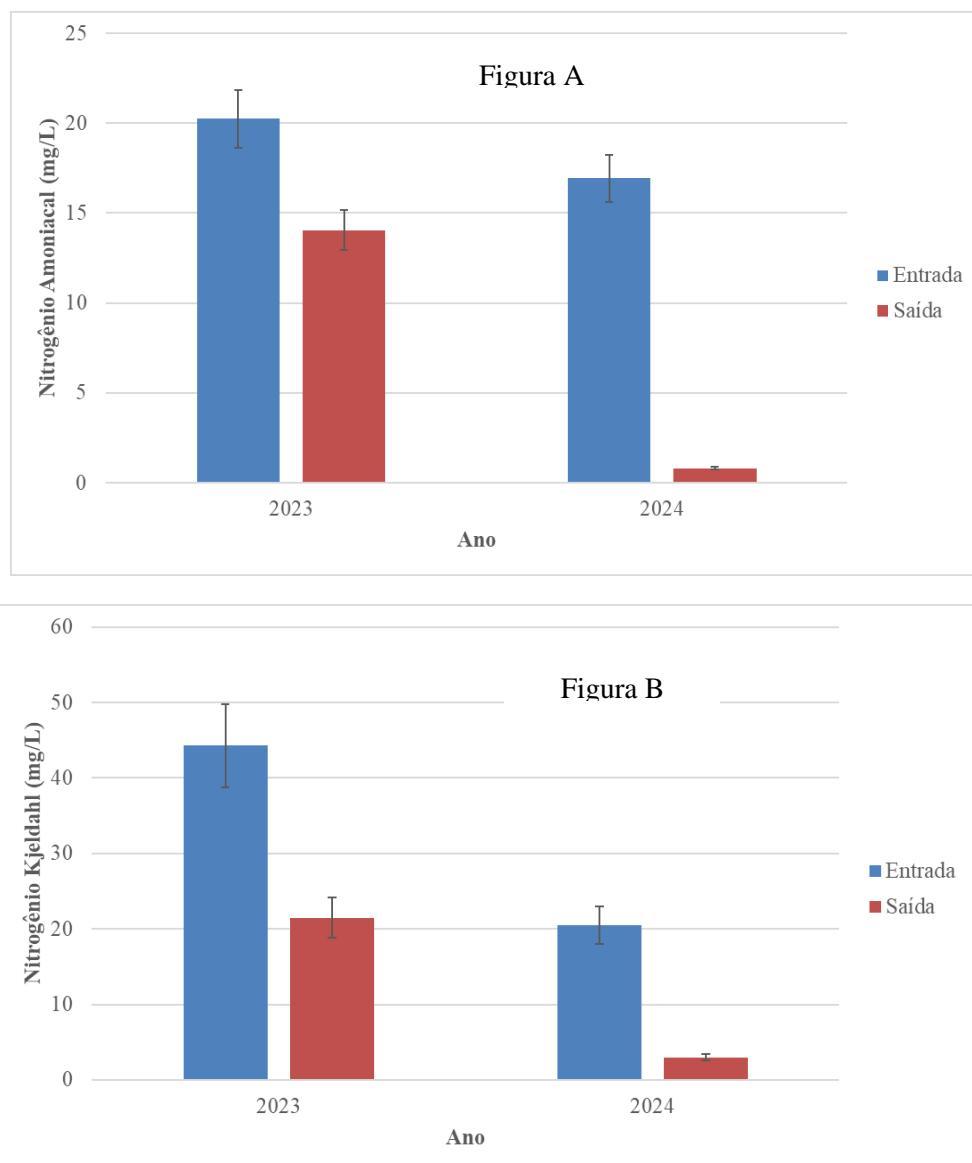
Os números extraídos da análise do nitrogênio total ficaram abaixo dos limites internacionais, enfatizando a eficiência do tratamento. Isso possibilita a redução do risco de enriquecimento dos corpos hídricos com nutrientes, levando à eutrofização. As variações do nitrito encontradas na entrada e saída da estação de tratamento foram de 0,005 a 0,33 mg L⁻¹. Esse aumento da concentração do nitrito na saída pode ser indicativo de nitrificação incompleta, demandando um monitoramento para evitar altos níveis de nitrito, tóxicos para a vida aquática.

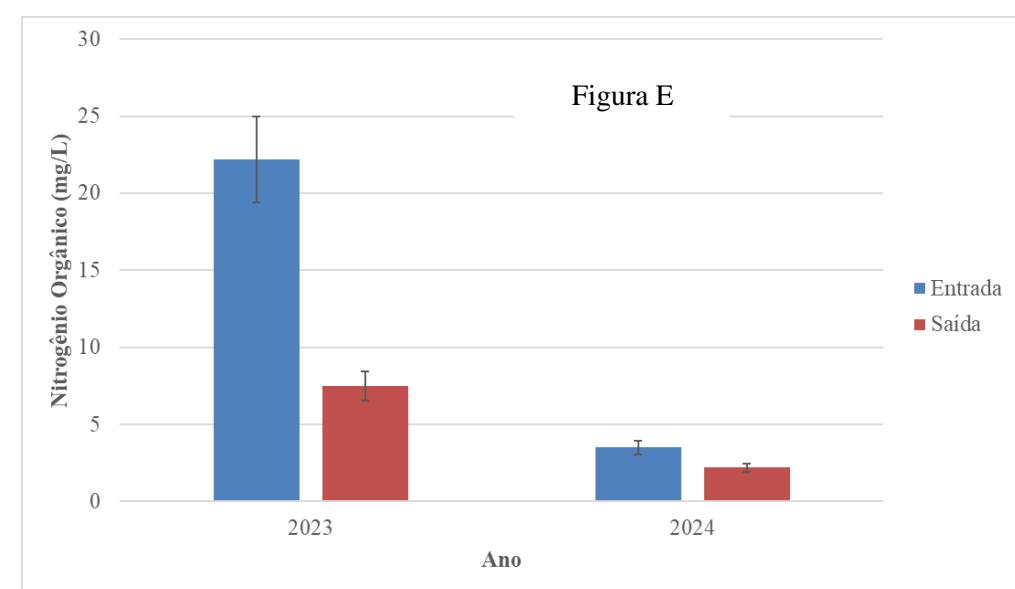
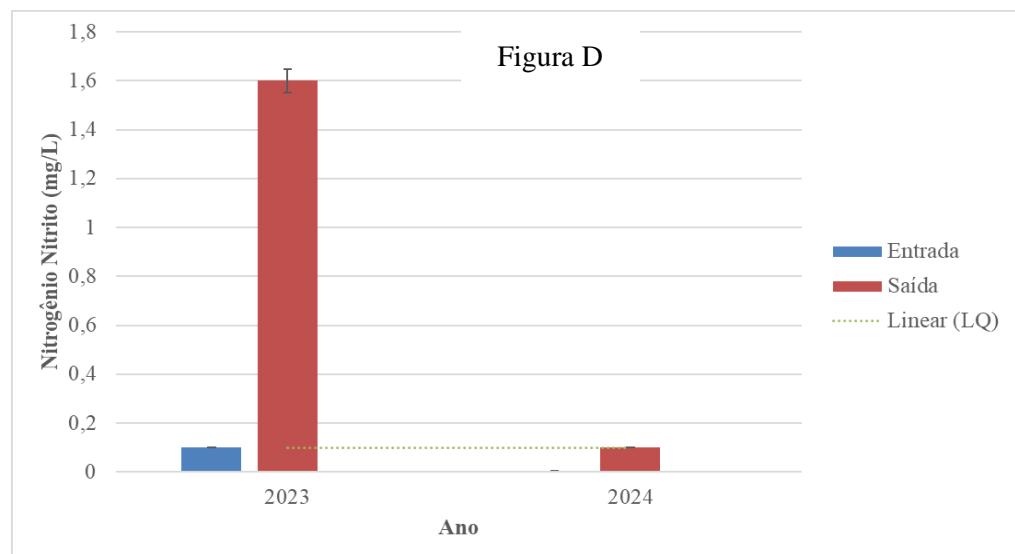
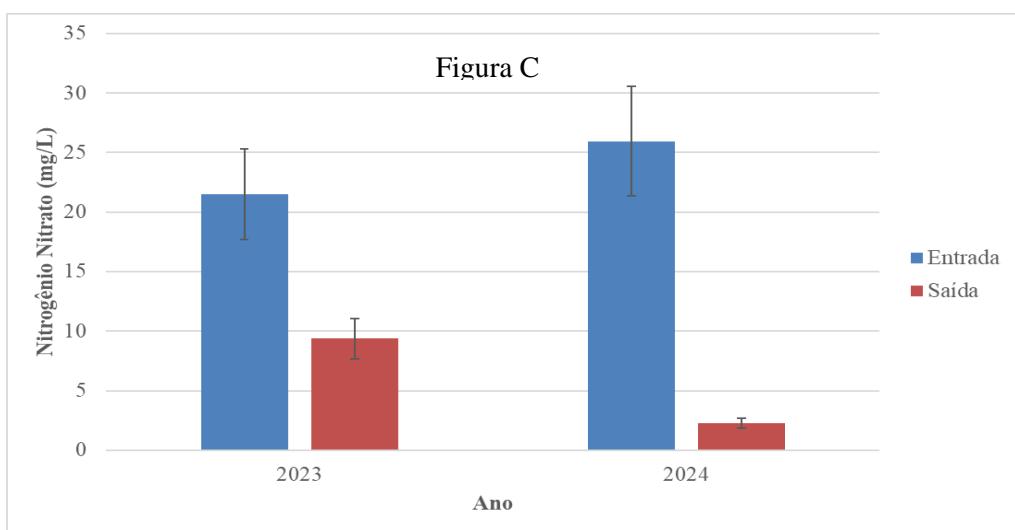
As concentrações médias de nitrato encontradas na entrada e saída da estação de tratamento variaram de 114,9 a 10,2 mg L⁻¹. A expressiva diminuição do nitrato é benéfica, na medida em que níveis elevados de nitrato contribuem para a eutrofização dos corpos hídricos. Os resultados envolvendo o pH na entrada e saída da estação de tratamento foram de 7,35 a 7,0 UpH, quantidade dentro do limite permitido pela legislação brasileira (5,0 a 9,0 UpH). Nesse

contexto, as concentrações estiveram dentro do intervalo permitido, sugerindo ser um valor adequado para a maioria dos organismos aquáticos.

Por outro lado, as concentrações médias do oxigênio dissolvido encontradas na entrada e saída da estação de tratamento variaram de 2,93 a 4,05 mg L⁻¹. O aumento do OD na saída reflete um efluente tratado que contribui positivamente para a qualidade do corpo hídrico receptor, fomentando a vida aquática.

A análise das formas de nitrogênio em efluentes, como posta na Figura 7, é essencial para o controle da qualidade em ETEs municipais, devido aos impactos ambientais e à saúde pública que os compostos nitrogenados podem causar.





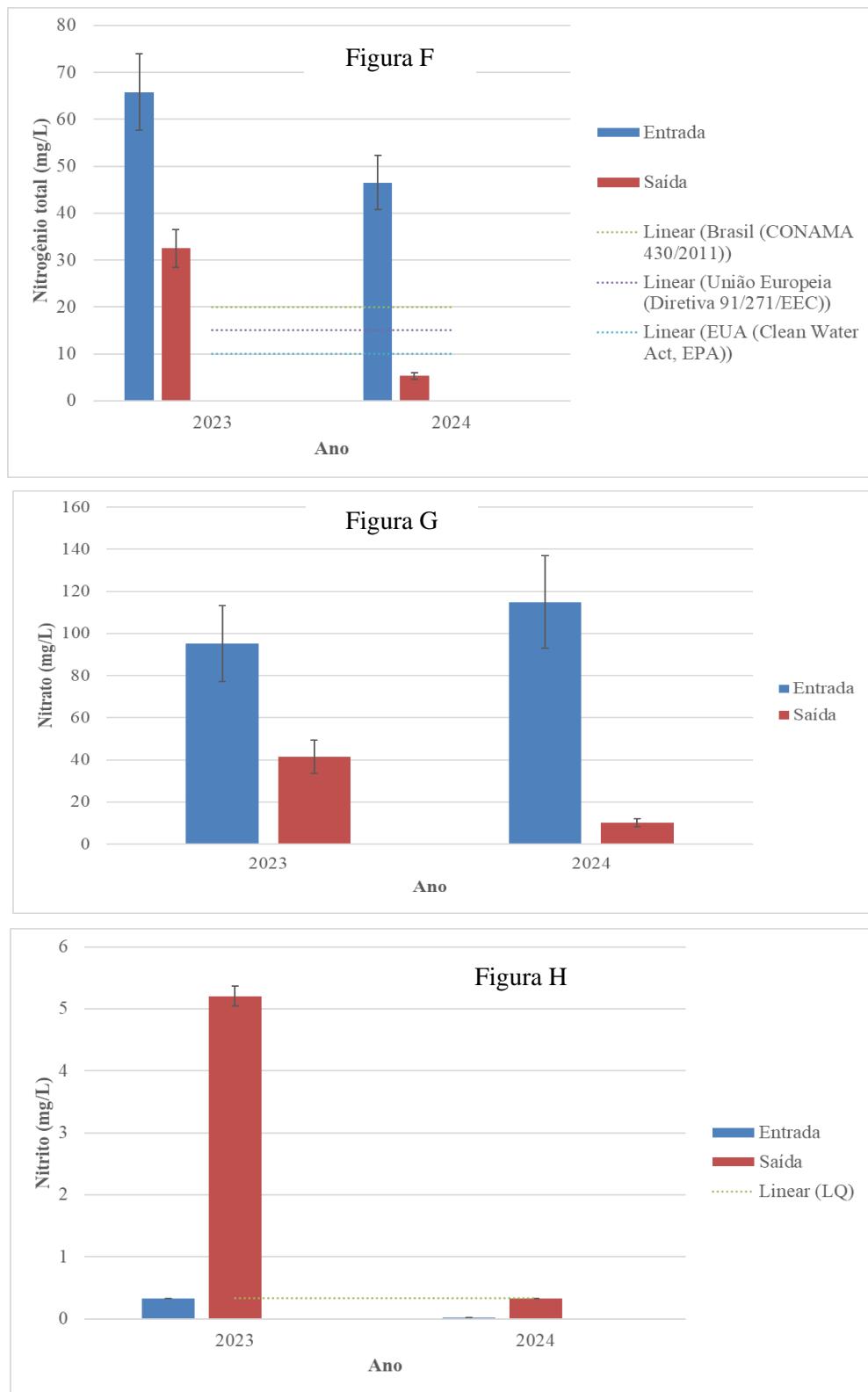


Figura 7 — Concentrações de (A) nitrogênio amoniacal (mg L^{-1}), (B) nitrogênio Kjeldahl (mg L^{-1}), (C) nitrogênio nitrato (mg L^{-1}), (D) nitrogênio nitrito (mg L^{-1}), (E) nitrogênio orgânico (mg L^{-1}), (F) nitrogênio total (mg L^{-1}), (G) nitrato (mg L^{-1}) e (H) nitrito (mg L^{-1}) na entrada e saída, nos anos 2023 e 2024, da estação de tratamento de esgoto de Turvânia, zona rural. **Fonte:** elaborada pela autora

No ano de 2023, as concentrações médias de nitrogênio amoniacal encontradas na entrada ($20,25 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($14,05 \text{ mg L}^{-1}$) da estação de tratamento sofreram variações para o ano (2024), cujos resultados foram ($16,94 \text{ mg L}^{-1}$) na entrada e ($0,82 \text{ mg L}^{-1}$) saída. O nitrogênio amoniacal é a forma de nitrogênio presente como amônia (NH_3) ou íon amônio (NH_4^+). O equilíbrio entre essas formas depende do pH e da temperatura da água. Essa forma de nitrogênio em níveis elevados ocasiona impactos ambientais, podendo ser tóxica para organismos aquáticos. Altos níveis desse parâmetro podem revelar a presença de matéria orgânica em decomposição. Sugere-se que o processo de nitrificação ainda não ocorreu completamente, tornando-se um indicador de poluição.

A análise de nitrogênio Kjeldahl, 2023, entrada ($44,3 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($21,5 \text{ mg L}^{-1}$) da estação de tratamento exibiu variação para o ano de (2024), cuja entrada resultou ($20,5 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($3,0 \text{ mg L}^{-1}$). Essa forma de nitrogênio representa a soma do nitrogênio amoniacal e do nitrogênio orgânico em uma amostra. Esse parâmetro exerce papel crucial devido ao indicador usado como etapa inicial para avaliar a quantidade de nitrogênio total presente na água. Ademais, o controle do tratamento ajuda a determinar a eficiência de processos biológicos no tratamento de esgoto.

Os resultados para o nitrogênio nitrato, 2023, cuja entrada ($21,5 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($9,38 \text{ mg L}^{-1}$) da estação de tratamento, sofreu variação para o ano de 2024, resultando na entrada ($25,95 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($2,30 \text{ mg L}^{-1}$). Essa concentração é uma forma oxidada do nitrogênio (NO_3^-), geralmente o produto final do processo de nitrificação em ETEs. Em excesso, o nitrogênio nitrato contribui para a eutrofização, promovendo o crescimento descontrolado de algas e diminuindo o oxigênio dissolvido no corpo hídrico. Em relação à qualidade da água, altos níveis podem representar riscos à saúde, especialmente para bebês, causando a síndrome do bebê azul (metemoglobinemia).

A quantidade de nitrogênio nitrito na entrada ($< 0,10 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($1,6 \text{ mg L}^{-1}$) da estação de tratamento em 2023 sofreu variação para o ano de 2024, cuja entrada resultou ($< 0,0050 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($< 0,10 \text{ mg L}^{-1}$). Essa concentração é uma forma intermediária no processo de nitrificação, que converte amônia em nitrato, e desnitrificação, que converte nitrato em gás nitrogênio. Esse componente indica processo biológico, como a presença de nitrito em níveis elevados, sugerindo falhas no processo de nitrificação. Com isso, o nitrito fica altamente tóxico para a vida aquática e para o consumo humano.

As concentrações médias, em 2023, de nitrogênio orgânico sinalizadas na entrada (22,2

mg L^{-1}) e saída ($7,5 \text{ mg L}^{-1}$) da estação de tratamento variaram no ano de (2024), resultando na entrada ($3,5 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($2,2 \text{ mg L}^{-1}$). Essa forma de nitrogênio presente em compostos orgânicos, como proteínas, aminoácidos e ureia, tem relevância no planejamento das etapas do tratamento biológico, visto que altos níveis tendem a apontar a poluição por resíduos orgânicos, esgotos domésticos, efluentes industriais ou agrícolas.

O nitrogênio total é a soma de todas as formas de nitrogênio presentes na amostra (nitrogênio amoniacal, orgânico, nitrito e nitrato). Averiguá-lo serve como ação avaliativa geral da carga nitrogenada, viabilizando a estimativa do impacto total do esgoto tratado no corpo receptor. Contudo, as legislações ambientais frequentemente estabelecem limites para o nitrogênio total.

O nitrato é outra forma oxidada do nitrogênio, similar ao nitrogênio nitrato. É frequentemente usado como indicador de poluição agrícola, de fertilizantes ou de águas residuais. Sua medição contribui para a análise dos prejuízos à saúde, já que altos níveis desse parâmetro representam riscos idênticos aos do nitrogênio nitrato, especialmente no abastecimento humano. Com isso, para a realização da gestão de nutrientes, é necessário monitorar corpos d'água que recebem esgotos tratados.

Já o nitrito é a forma intermediária de nitrogênio, menos estável que o nitrato, entretanto mais reativa. Essa substância em níveis altos mostra problemas no tratamento do efluente e nitrificação incompleta. Incluir tal parâmetro ajuda no levantamento da toxicidade para organismos aquáticos e potenciais perigos para a saúde humana.

Diante disso, é crucial manter o monitoramento desses parâmetros, a fim de controlar a eutrofização e, assim, minimizar os prejuízos nos corpos receptores, prevenindo o crescimento excessivo de algas. Para mais, garante-se que os efluentes lançados estejam dentro dos padrões regulamentares pelas legislações, contribuindo para a redução de risco de contaminação da água destinada ao consumo humano e refletindo positivamente na saúde pública.

O monitoramento auxilia na identificação de falhas nos processos de tratamento, permitindo ajustes operacionais. As medições de nitrogênio em suas diferentes formas são fundamentais para avaliar a eficiência do tratamento, o impacto ambiental e os riscos à saúde pública. Cada parâmetro oferece informações específicas e complementares, viabilizando o controle eficaz dos efluentes em estações de tratamento de esgoto municipais.

Em 2023, o aumento de nitrito (NO_2^-) entre a entrada ($< 0,330 \text{ mg L}^{-1}$) e saída ($5,200 \text{ mg L}^{-1}$) do tratamento de efluentes apresentava um indicativo de processo intermediário de

nitrificação incompleto ou ineficiente. A nitrificação é uma etapa comum em muitos tratamentos de efluentes, especialmente no tratamento biológico, e envolve a conversão do amônio (NH_4^+) em nitrito e, posteriormente, em nitrato (NO_3^-).

O resultado do aumento do nitrito pode ser explicado pela nitrificação incompleta. A presença de nitrito em concentração elevada na saída do tratamento sugere que o processo de conversão do amônio (NH_4^+) para nitrato (NO_3^-) está ocorrendo de forma incompleta. A nitrificação ocorre em duas etapas principais:

- Etapa 1: amônio (NH_4^+) → nitrito (NO_2^-), realizada por bactérias como *Nitrosomonas*;
- Etapa 2: nitrito (NO_2^-) → nitrato (NO_3^-), realizada por bactérias como *Nitrobacter*.

Se há o aumento de nitrito, levanta-se a hipótese de que as bactérias responsáveis pela segunda etapa, conversão de nitrito em nitrato, estão sendo inibidas ou não são suficientemente eficientes. Na correlação do aumento do nitrito aos problemas no processo biológico, esse aumento conecta-se a vários fatores limitantes que afetam o funcionamento das bactérias nitrificantes, como aparece no Quadro 2.

Quadro 2 — Descrição de fatores limitantes devido ao aumento do nitrito

Fatores limitantes	Descrição
Baixa disponibilidade de oxigênio	A conversão de nitrito em nitrato requer oxigênio, e baixos níveis de oxigênio dissolvido podem inibir essa etapa.
Flutuações de temperatura	A atividade das bactérias nitrificantes é sensível à temperatura, e baixas temperaturas podem reduzir a eficiência da nitrificação.
Presença de toxinas	Algumas substâncias no efluente podem inibir as bactérias que fazem a conversão do nitrito.

Fonte: elaborado pela autora.

O nitrito é mais tóxico para a vida aquática que o nitrato. Segundo a legislação, tem potencial de toxicidade devido à sua interferência na capacidade dos organismos de absorver oxigênio. Sendo assim, o aumento de nitrito na saída do tratamento é indesejável do ponto de vista ambiental e de saúde pública. Consequentemente, o nitrito em corpos d'água pode ser tóxico para peixes e outros organismos aquáticos, prejudicando os ecossistemas e causando impactos ambientais negativos. Além disso, esse aumento pode apresentar problemas de qualidade da água, comprometendo-a para o uso agrícola ou recreacional.

De acordo com os resultados coletados, sugerem-se as possíveis ações corretivas, mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 — Ações corretivas para a melhoria do tratamento do nitrato

Ações corretivas	Descrição
Melhoria da aeração	Aumentar o oxigênio disponível pode ajudar a garantir que a conversão completa de nitrito em nitrato ocorra.
Ajuste de parâmetros operacionais	Controlar a temperatura e evitar a presença de compostos tóxicos pode melhorar o desempenho das bactérias nitrificantes.

Fonte: elaborado pela autora.

Em síntese, o aumento de nitrito indica que o processo de nitrificação não está ocorrendo de maneira completa, o que pode resultar em problemas ambientais e alterar a qualidade do efluente tratado. Os valores recomendados para oxigênio dissolvido (OD) em estações de tratamento de esgoto (ETE) variam conforme o tipo de processo empregado, mas seguem critérios técnicos para garantir a eficiência e atender às normas ambientais, como a Resolução CONAMA n.º 357/2005 (Brasil, 2005).

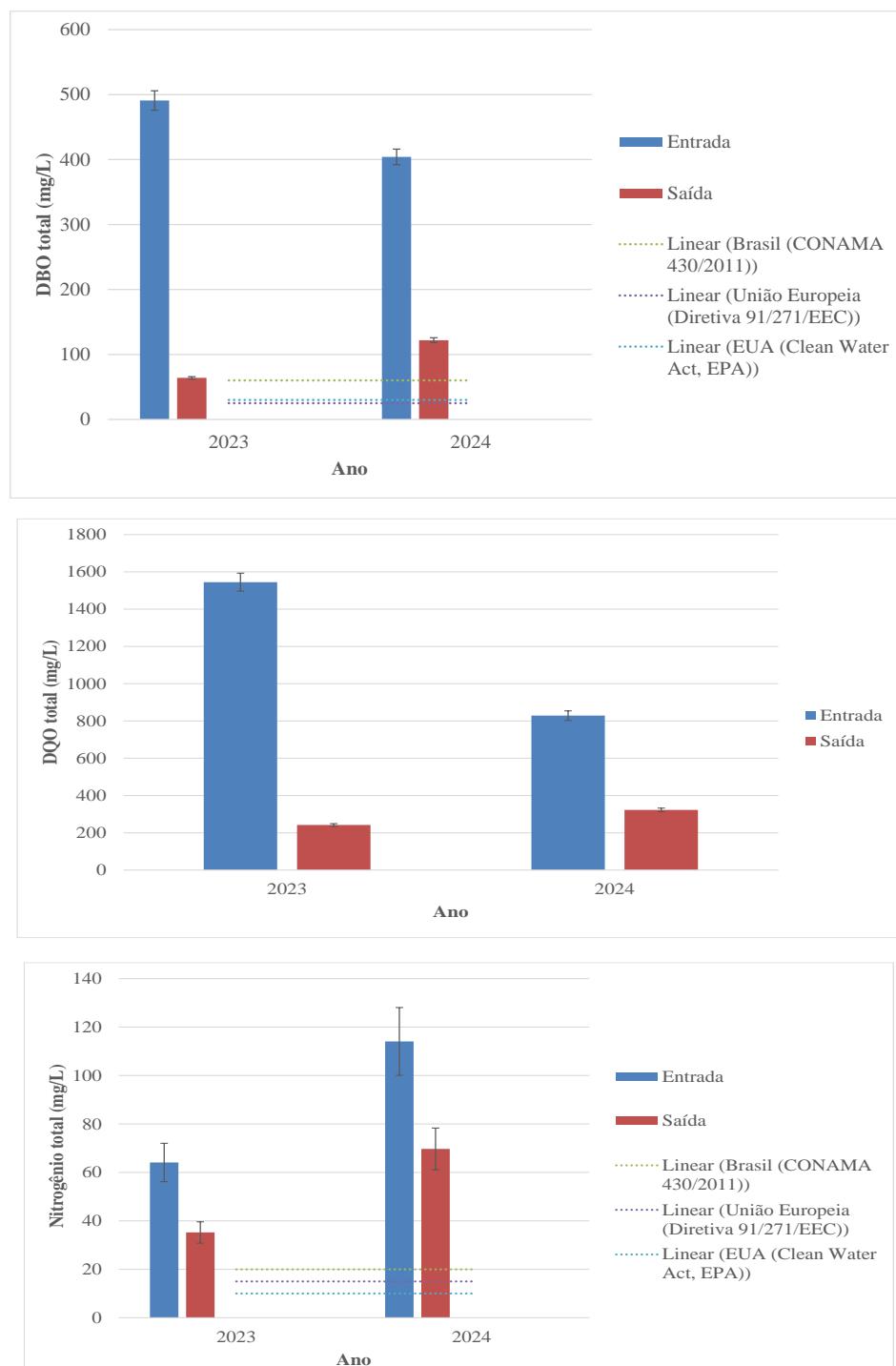
No contexto geral, para o tratamento aeróbio, os níveis de OD devem ser mantidos acima de 2 mg L^{-1} , para sustentar a atividade dos microrganismos que realizam a decomposição da matéria orgânica. Valores ideais podem estar entre 2 e 4 mg L^{-1} , dependendo do projeto específico da ETE.

No caso de lagos de polimento ou tratamentos secundários, estes podem operar com valores de OD um pouco mais baixos, próximos de 1 mg L^{-1} , desde que o fluxo de oxigênio seja suficiente para evitar condições anaeróbias indesejáveis. Contudo, em águas receptoras, após o lançamento do efluente tratado, o OD no corpo hídrico receptor deve ser mantido acima de 5 mg L^{-1} em águas de classe 1 para preservar a vida aquática.

Dessa forma, os resultados indicam que a ETE Turvínia está operando de acordo com os parâmetros estabelecidos pela legislação, com boa eficiência na remoção de matéria orgânica, nutrientes e compostos tóxicos. O efluente final permanece com baixo impacto ambiental potencial. Entretanto, o aumento do nitrito na saída requer atenção e monitoramento contínuo para assegurar a completa nitrificação e minimizar a toxicidade do efluente.

3.3.2. Estação de tratamento de esgoto — distrito de Botafogo, zona rural

Em relação à ETE do distrito de Botafogo, a Figura 8 reúne dados relacionados à qualidade da água no tratamento de seu esgoto, considerando os parâmetros de entrada e saída. Com base nos resultados de 2023 e 2024, observam-se variações nos indicadores-chave. A análise considera as incertezas de medição e os limites de quantificação. A seguir, são apresentados os indicadores críticos de melhorias e pioras no tratamento do efluente, comparados às legislações brasileira, europeia e norte-americana:



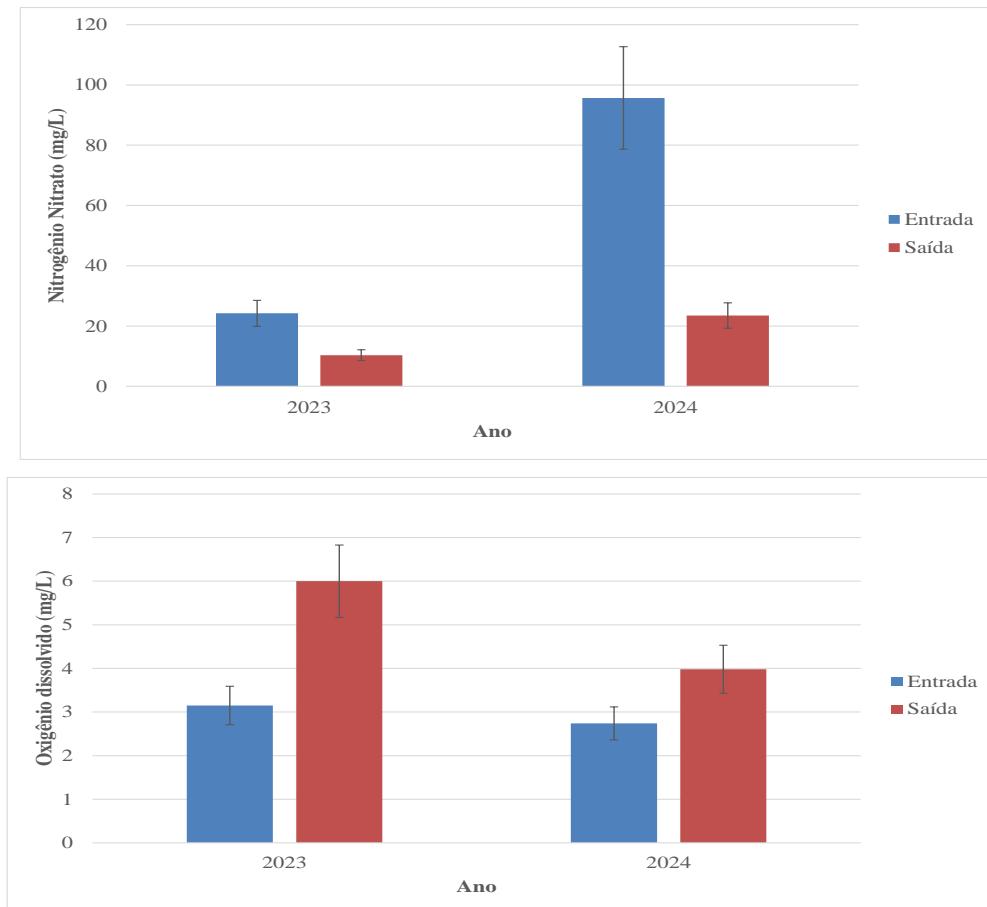


Figura 8 — Concentrações encontradas na saída da estação de tratamento, nos anos de 2023 e 2024, da demanda bioquímica de oxigênio (DBO total), demanda química de oxigênio (DQO total), nitrogênio total, nitrogênio nitrato (NO_3^-) e oxigênio dissolvido (OD). **Fonte:** elaborada pela autora.

As concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO total) coletadas na saída da estação de tratamento de esgoto nos anos de 2023 e 2024 variaram de 64 mg L^{-1} (2023) para 122 mg L^{-1} (2024), apresentando uma piora nos anos analisados. A variável indicou redução na eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável. De acordo com a legislação brasileira CONAMA n.º 430/2011, o limite máximo é de 40 mg L^{-1} , ambos os anos exibiram valores acima do limite máximo permitido.

Em relação à demanda química de oxigênio (DQO total), as concentrações na saída da estação variaram de 242 mg L^{-1} (2023) a 323 mg L^{-1} (2024). Esse aumento da DQO evidencia menor eficiência na remoção de matéria orgânica total. Quanto ao impacto regulatório, segundo as normas europeias (União Europeia, 1991), o limite para DQO é de 125 mg L^{-1} . Ambos os valores, de 2023 e 2024, excedem o limite estabelecido.

Analizando as variáveis comparativas do nitrogênio total na saída da estação, com

concentrações de $35,2 \text{ mg L}^{-1}$ (2023) e $69,7 \text{ mg L}^{-1}$ (2024), percebe-se que a concentração dobrou, indicando desempenho insatisfatório na remoção de nitrogênio. No Brasil, o limite permitido pela legislação é de 20 mg/L (CONAMA, 2011); nos EUA, há variação de 3 a 10 mg L^{-1} (EPA, 2023). Ambos os anos apresentaram valores acima dos limites.

As concentrações de nitrogênio nitrato (NO_3^-) encontradas na saída da estação variaram de $45,85 \text{ mg L}^{-1}$ (2023) para 104 mg L^{-1} (2024). Esse fato evidencia que houve piora crítica nesse parâmetro. O nitrogênio nitrato aumentou mais de 100%, podendo, assim, causar problemas ambientais como eutrofização. Os limites regulatórios geralmente variam de 10 mg L^{-1} (EPA, 2023) a 50 mg L^{-1} (União Europeia, 1991). O valor de 2024 excede todos os limites das legislações.

O oxigênio dissolvido (OD), coletado na saída da estação, com variáveis de 6 mg L^{-1} (2023) e $3,98 \text{ mg L}^{-1}$ (2024), mostrou redução, o que pode indicar aumento de carga orgânica residual ou problemas de aeração no tratamento. Por essa razão, pode haver impactos ambientais, pois valores abaixo de 4 mg L^{-1} são críticos para a manutenção da vida aquática (CONAMA, 2011; EPA, 2023).

São importantes as considerações sobre os valores de oxigênio dissolvido (OD) na entrada e na saída da estação, pois estes são essenciais para avaliar a qualidade da água e o desempenho do tratamento biológico da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). O OD, segundo a Tabela 3, reflete tanto a condição inicial do efluente bruto (entrada) quanto a eficiência do processo (saída).

Tabela 3 — Análise do oxigênio dissolvido na entrada e saída do tratamento do efluente, com percentual de redução entre 2023 e 2024

PARÂMETRO	NORMATIVA		
	2023	2024	Redução
Entrada	$3,15 \text{ mg L}^{-1}$ ($U = 0,44$)	$2,74 \text{ mg L}^{-1}$ ($U = 0,38$)	13% entre 2023/2024
Saída	6 mg L^{-1} ($U = 0,83$)	$3,98 \text{ mg L}^{-1}$ ($U = 0,55$)	33,7% entre 2023/2024

Fonte: elaborada pela autora.

Entrada (efluente bruto)

Nos dois anos analisados, os valores de DBO na entrada são baixos, evidenciando que o esgoto bruto possui elevada carga orgânica e/ou demanda biológica que consome oxigênio antes de ser direcionado ao sistema de tratamento. A pequena redução observada em 2024 (2,74 mg L⁻¹) pode estar relacionada a um incremento na carga orgânica ou à diminuição da aeração no ponto de coleta.

Saída (efluente tratado)

Em 2023, o valor de OD na saída (6 mg L⁻¹) é satisfatório e suficiente para suportar a manutenção da vida aquática, atendendo aos padrões regulatórios. Este valor sugere que o sistema de aeração ou o processo biológico foi eficaz em 2023. Entretanto, em 2024, o OD na saída caiu para 3,98 mg L⁻¹, valor próximo ao limite inferior aceitável para a manutenção da vida aquática e para o cumprimento de legislações ambientais brasileiras (CONAMA n.º 357/2005) e internacionais. Essa redução indica deterioração na qualidade da água tratada, isto é, uma piora no desempenho do tratamento. O oxigênio dissolvido abaixo de 4 mg L⁻¹ pode comprometer a sobrevivência de peixes e organismos aeróbicos, além de prejudicar a capacidade de autodepuração dos corpos d'água receptores. As causas possíveis para a redução em 2024 são encontradas no Quadro 4:

Quadro 4 — Possíveis fatores que contribuíram para a redução do oxigênio dissolvido em 2024

Causas para a redução do oxigênio dissolvido em 2024		
Sobrecarga no sistema de tratamento: o crescimento nos indicadores de carga orgânica, tais como DBO e DQO, sugere que o sistema pode estar funcionando além da capacidade, consumindo mais oxigênio no processo de degradação biológica.	Ineficiência na aeração: dificuldades no sistema de aeração ou falta de oxigênio podem ter diminuído a oxigenação no tanque de tratamento, levando a uma redução no OD na saída.	Maior demanda biológica: o aumento de nitrogênio total e nitrato sugere que os processos de nitrificação e desnitrificação podem estar consumindo maior quantidade de oxigênio, reduzindo os níveis finais de oxigênio dissolvido.

Fonte: elaborado pela autora.

Recomenda-se a implementação de monitoramento contínuo, com frequência do parâmetro do OD na entrada e na saída, para identificar oscilações e relacioná-las com alterações operacionais ou mudanças na carga de entrada. Além disso, é importante reavaliar o sistema de aeração, difusores, sopradores e tanques aerados para garantir que o fornecimento de oxigênio seja adequado ao aumento da carga orgânica.

Ademais, deve-se traçar estratégias de redução da carga orgânica na entrada, como a separação de resíduos industriais ou o pré-tratamento de efluentes com alta carga de DBO e DQO. Nesse contexto, o município possui legislação sobre o descarte de resíduos industriais em rede de esgoto própria, entretanto não realiza a fiscalização necessária para o cumprimento da normativa municipal.

Outro fator importante é verificar a otimização dos processos de nitrificação/desnitrificação e, se necessário, ajustá-los para evitar consumo de oxigênio no tanque de tratamento sem necessidade. Em síntese, a análise efetuada entre os anos de 2023 e 2024 apresenta o bom desempenho da ETE em 2023. Por outro lado, no ano de 2024, verifica-se diminuição da eficiência do sistema. A redução do OD na saída em 2024 pode comprometer a conformidade ambiental e deve ser corrigida imediatamente.

Alguns parâmetros sinalizaram estabilidade, dentro do limite de quantificação, como o nitrogênio nitrito (NO_2^-), que permaneceu constante em $0,015 \text{ mg L}^{-1}$ ($\text{U}=0$), conforme apresentado na Figura 9:

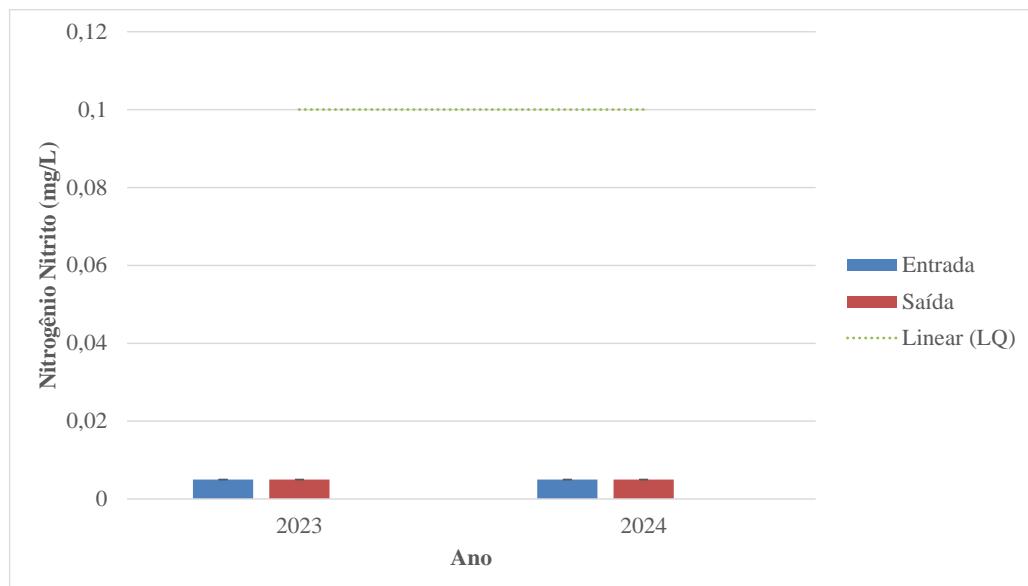


Figura 9 — Análise do nitrogênio nitrito, na entrada e saída, nos anos de 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

Em relação à análise dos impactos regulatórios, percebe-se na Figura 10 que o parâmetro nitrogênio nitrito está abaixo dos limites brasileiro (CONAMA n.º 430/2011) e europeu (Diretiva 91/271/CEE), confirmando a sua adequação.

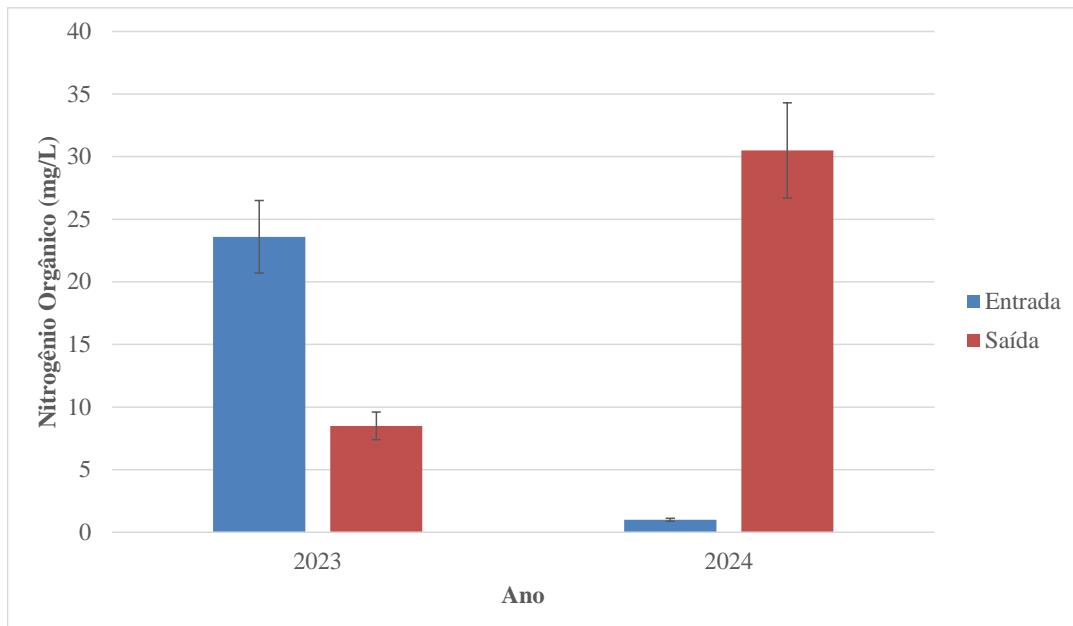


Figura 10 — Análise do nitrogênio orgânico, na entrada e saída, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora.

Nota-se piora na análise da saída de 2024 ($30,5 \text{ mg L}^{-1}$, $U=3,8$) em comparação a 2023 ($8,5 \text{ mg L}^{-1}$, $U=1,1$). Este aumento sugere maior concentração de compostos nitrogenados não convertidos no processo de tratamento biológico. Considerando as legislações, parâmetros críticos, DBO, DQO, nitrogênio total e nitrato, superaram os limites brasileiros (CONAMA, 2011), europeus (União Europeia, 1991) e estadunidenses (EPA, 2023), evidenciando necessidade de melhorias no tratamento biológico e físico-químico.

Todavia, o fósforo total, mesmo com melhorias ($3,82 \text{ mg L}^{-1}$ em 2023 para $4,307 \text{ mg L}^{-1}$ em 2024), mantém-se elevado, segundo as legislações estrangeiras, que sugerem valores máximos entre $0,5$ e 2 mg L^{-1} , conforme a Figura 11 a seguir.

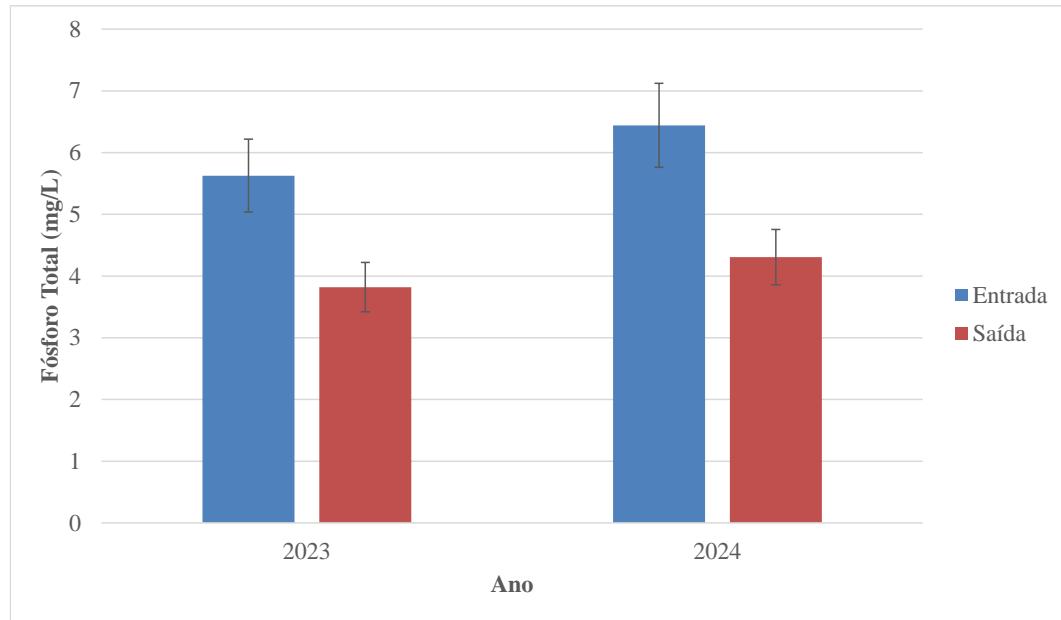


Figura 11 — Análise do fósforo total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora.

Há necessidade de melhorias operacionais por meio de uma reavaliação do sistema de aeração. Para isso, deve-se aumentar o oxigênio dissolvido, melhorar a remoção de DBO e DQO, implementar sistemas de desnitrificação mais eficientes para reduzir o nitrogênio total e nitrato, e considerar o uso de coagulantes e floculantes para otimizar a remoção de fósforo.

Além disso, é importante realizar monitoramento, garantir análises periódicas e alinhadas às legislações. Para tal, precisa-se priorizar a adequação dos parâmetros críticos, DBO, DQO, nitrogênio total e nitrato, aos limites brasileiros, europeus e norte-americanos, a fim de evitar sanções ambientais.

Outro fator relevante é avaliar a capacidade atual do sistema de tratamento face ao aumento de cargas orgânicas e inorgânicas para entender os resultados negativos entre 2023 e 2024. Essa análise revela a importância de intervenções imediatas para adequar-se aos limites legais e atenuar os impactos ambientais.

3.3.3. Estação de tratamento de esgoto — São Carlos, zona urbana

Com base na análise da entrada e saída, nos anos de 2023 e 2024, do tratamento de esgoto em São Carlos e interpretação dos dados, comparam-se os valores máximos permitidos pela legislação (CONAMA n.º 430/11, Art. 16, e Dec. n.º 8.468/1976, Art. 18), análise revisada da evolução dos dados em relação às melhorias no desempenho apresentadas na Figura 12.

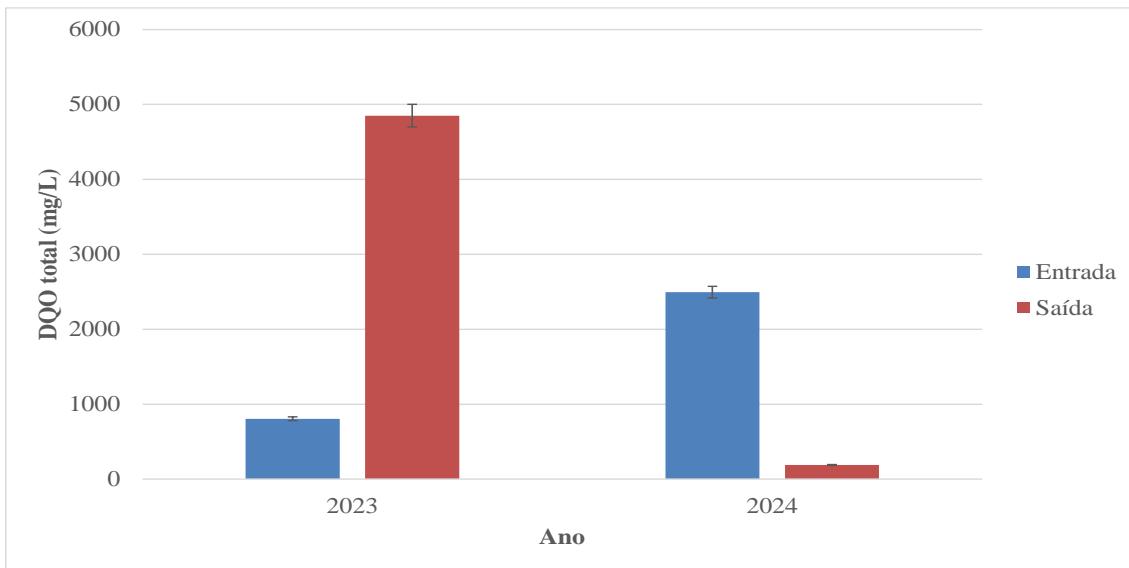


Figura 12 — Análise da demanda química de oxigênio (DQO), na entrada e saída, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

A análise evidenciou a redução significativa no valor de saída, de 4.850 (incerteza 150) em 2023 para 190 (incerteza 5,9) em 2024, indicando avanço no desempenho do sistema, conforme expõe a Figura 13.

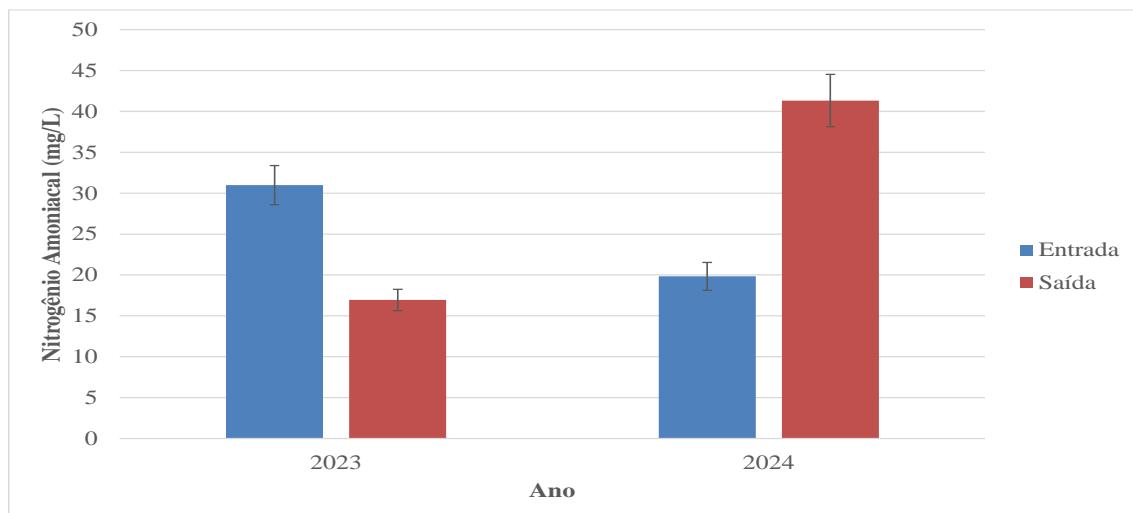


Figura 13 — Análise do nitrogênio amoniacial, na entrada e saída, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

Identifica-se, na Figura 14, maior eficiência no controle desse parâmetro, com a redução do valor de saída de 12,3 (incerteza 0,77) para 5 (incerteza 0,000).

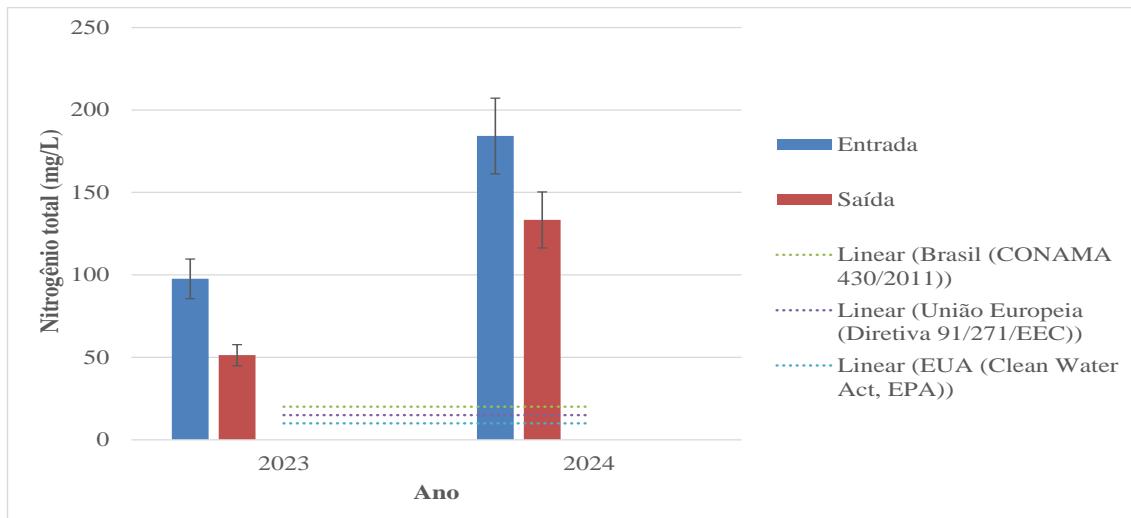


Figura 14 — Análise do nitrogênio total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

O nitrogênio total aumentou expressivamente na entrada (186,6 para 462,6) da estação de tratamento, com pequena redução na saída (131,1 para 118,1), mostrando que o sistema conseguiu trabalhar com a carga adicional. Os valores elevados de nitrogênio total na saída indicam presença significativa de compostos nitrogenados no efluente tratado, o que contribui para a eutrofização e a contaminação dos corpos d’água.

Com base na Tabela 4, observa-se que os valores de nitrogênio total (entrada e saída) na ETE São Carlos são avaliados considerando os limites máximos estipulados pelas legislações ambientais do Brasil, Estados Unidos e União Europeia.

Tabela 4 — Análise comparativa do nitrogênio total, na entrada e saída, entre 2023 e 2024, e incertezas

PARÂMETROS	NORMATIVA		VALOR DE REFERÊNCIA mg L ⁻¹
	Entrada	Saída	
Nitrogênio total	2023: 186,6 (incerteza 35) 2024: 462,6 (incerteza 87)	2023: 131,1 (incerteza 25) 2024: 118,1 (incerteza 22)	

Fonte: elaborada pela autora.

De acordo com os limites legais de nitrogênio total, a legislação brasileira (CONAMA n.º 430/2011 e 357/2005) entra em pauta, pois estabelece diretrizes para o lançamento de

efluentes em corpos hídricos de classe 2, cujo limite do nitrogênio total é de 20 mg L^{-1} . Desse mesmo modo, a legislação dos EUA (EPA, 2023), que define limites conforme o tipo de corpo receptor e programa estadual, mas para águas superficiais, o limite varia geralmente entre 10 e 15 mg L^{-1} , dependendo da região e do uso do corpo hídrico. E, ainda, na legislação da União Europeia (1991), que norteia estações de tratamento em áreas sensíveis, o limite máximo é de 10 mg L^{-1} para nitrogênio total, visando evitar a eutrofização. As comparações foram efetuadas nas Tabelas 5 e 6:

Tabela 5 — Concentração de nitrogênio total ($131,1 \text{ mg L}^{-1}$) coletado na estação de tratamento de esgoto, na saída, no ano de 2023, em comparação aos limites das legislações brasileira, europeia e norte-americana

NORMATIVA — 2023			
PARÂMETROS	Valor de Saída: 131,1	Limite legal	VALOR DE REFERÊNCIA
Brasil	Excede aproximadamente 6,5 vezes o limite	20	
EUA	Excede entre 8,7 e 13 vezes o limite	10–15	mg L^{-1}
UE	Excede mais de 13 vezes o limite	10	

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 6 — Concentração de nitrogênio total ($118,1 \text{ mg L}^{-1}$) coletado na estação de tratamento de esgoto, na saída, no ano de 2024, em comparação aos limites das legislações brasileira, europeia e norte-americana

NORMATIVA — 2024			
PARÂMETROS	Valor de Saída: 118,1	Limite legal	VALOR DE REFERÊNCIA
Brasil	Excede mais de 5,9 vezes o limite	20	
EUA	Excede entre 7,9 e 11,8 vezes o limite	10–15	
UE	Excede mais de 11 vezes o limite	10	mg L^{-1}

Fonte: elaborada pela autora.

Seguindo a avaliação crítica da eficiência do sistema, apesar da redução da concentração de nitrogênio total (de $462,6 \text{ mg L}^{-1}$ na entrada para $118,1 \text{ mg L}^{-1}$ na saída em 2024), a remoção ainda não foi suficiente para atender às exigências legais. A eficiência na diminuição do

nitrogênio total em 2024 foi de aproximadamente 74,5%, entretanto não garantiu conformidade.

As concentrações elevadas de nitrogênio total contribuem para impactos potenciais de eutrofização de corpos hídricos, causando proliferação de algas, redução de oxigênio dissolvido e danos aos ecossistemas aquáticos.

Na comparação temporal, a redução de nitrogênio total de 2023 ($131,1 \text{ mg L}^{-1}$) para 2024 ($118,1 \text{ mg L}^{-1}$) foi insuficiente para alcançar os padrões regulatórios. Fatores relevantes nos aspectos operacionais que justificam o aumento considerável da carga de entrada de nitrogênio total de 2023 para 2024 ($186,6$ para $462,6 \text{ mg L}^{-1}$) podem ser a maior pressão sobre a ETE, o crescimento populacional, as mudanças nos tipos de afluentes ou as limitações no pré-tratamento.

Em conformidade com as análises dos dados, recomenda-se o aprimoramento do processo de remoção de nitrogênio, considerando tecnologias avançadas, como nitrificação e desnitrificação biológica, em etapas separadas. Outras ações incluem analisar a viabilidade do uso de reatores anammox² para maior eficiência em altas cargas e investigar a carga de entrada, propondo um estudo para identificar a origem do aumento expressivo de nitrogênio total na entrada, no ano de 2024.

Outra possibilidade são ajustes na operação para atender aos padrões legais, implementando melhorias no sistema de controle operacional, como ajustes no tempo de retenção hidráulica e na oxigenação. Deve-se intensificar o monitoramento dos efluentes para garantir conformidade com as normativas, evitando, assim, sanções ambientais. A partir dos resultados entre 2023 e 2024, a Figura 15 destaca que os parâmetros apresentaram diminuição no desempenho de um ano para o outro.

² Os reatores *anammox* são sistemas que usam bactérias anaeróbias oxidadoras de amônia (*anammox*) para remover nitrogênio de efluentes. O processo ANAMMOX (do inglês *anaerobic ammonium oxidation*) é uma tecnologia promissora para tratar efluentes de agroindústrias, por exemplo, pois transforma compostos nitrogenados indesejados em gás nitrogênio.

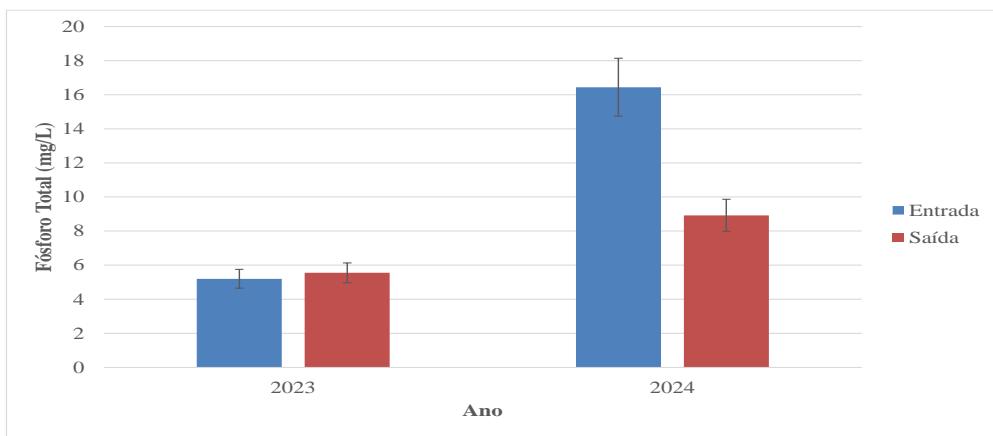


Figura 15 — Análise do fósforo total, entre 2023 e 2024, com baixo desempenho. **Fonte:** elaborada pela autora

Para esse indicador, percebe-se que o valor de saída aumentou de 5,55 (incerteza 0,58) em 2023 para 8,922 (incerteza 0,94) em 2024, demonstrando piora no controle desse parâmetro. Nas análises dos sólidos totais, notou-se que a saída aumentou significativamente, de 16,94 (incerteza 1,3) para 41,32 (incerteza 3,2), indicando piora na remoção de sólidos no sistema. Além disso, o sulfato também apresentou na saída aumento de 21,7 (incerteza 2,7) para 106,6 (incerteza 13), revelando a possibilidade de carga maltratada ou aumento de fontes de entrada. Em relação ao nitrogênio amoniacal, a incerteza do resultado de saída em 2024 é muito baixa (0,000), sugerindo precisão elevada; contudo, requer validação para evitar interpretações errôneas.

Quanto às análises efetuadas, apurou-se a consistência dos dados e incertezas, sendo que parâmetros com incerteza “0” — por exemplo, valores como 0,005 (sólidos dissolvidos totais) e 0,015 (fósforo dissolvido) — indicam resultados no limite de quantificação do método. Embora aparentem estabilidade, esses valores podem mascarar flutuações que escapam da capacidade analítica.

É importante ressaltar que alguns parâmetros apresentaram crescimento significativo na entrada de 2023 para 2024 (DQO e nitrogênio total), refletindo maior pressão sobre o sistema. Entretanto, ainda que tenha havido aumento da carga na entrada, parâmetros como DQO e nitrogênio amoniacal tiveram eficiência no tratamento. Por outro lado, parâmetros como fósforo e sólidos totais evidenciaram a necessidade de melhorias operacionais.

Diante do exposto, sugere-se uma análise da gestão de fósforo e sólidos totais, revisando os procedimentos operacionais para aprimorar a eliminação desses compostos. Para as fontes de sulfato, indica-se acompanhamento e detecção de possíveis elevações na carga de entrada

ou mudanças nos processos que possam ter provocado o aumento de sulfato na saída.

Com relação às técnicas de medição, é importante checar os valores com incerteza “0”, para que representem corretamente o rendimento real. Por último, convém a adoção de possíveis modificações operacionais para gerenciar de maneira mais eficaz o crescimento da carga na entrada, particularmente para parâmetros que apresentam queda de desempenho. Contudo, em relação ao ano de 2024 e aos resultados da ETE São Carlos, foram considerados também os limites máximos estabelecidos pela legislação e a incerteza de medição fornecida, reunidos na Figura 16.

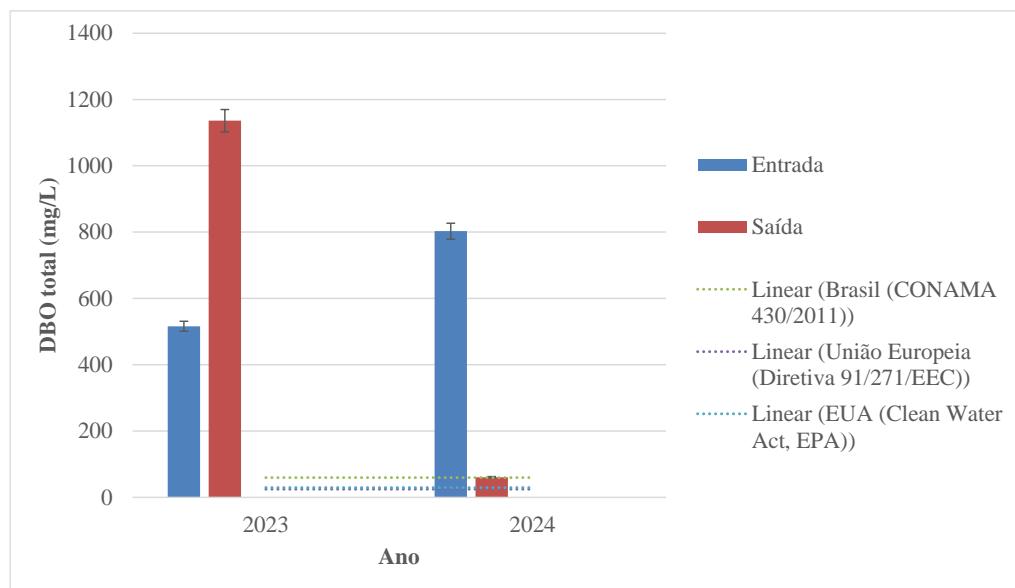


Figura 16 — Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), entre 2023 e 2024, com baixo desempenho. **Fonte:** elaborada pela autora.

Tendo em vista o limite máximo permitido pelo Decreto n.º 8.468/76 de 60 mg L^{-1} , verifica-se que o valor da DBO na saída (61 mg L^{-1}), considerando a incerteza, está próximo, mas ligeiramente acima do limite estipulado. Isso indica que a ETE São Carlos está quase atendendo aos padrões de qualidade exigidos para esse parâmetro, mas ainda precisa de ajuste.

O nitrogênio amoniacal é outro parâmetro cujo valor da saída ($41,32 \pm 3,2 \text{ mg L}^{-1}$) encontra-se acima do limite permitido (20 mg L^{-1} segundo a Resolução CONAMA n.º 430/2011), enquanto o seu valor de entrada é de $19,83 \pm 1,5 \text{ mg L}^{-1}$. A ETE, portanto, não removeu amônia de forma eficaz, o que pode ser prejudicial à vida aquática devido à sua toxicidade.

Por sua vez, o nitrito gerou os valores de entrada e saída de $0,015 \pm 0,002 \text{ mg L}^{-1}$. Ainda que a legislação não informe um limite específico, os altos níveis de nitrato presentes na saída

podem contribuir para a eutrofização. Evidencia-se que, nos parâmetros de 2024 apresentados na Figura 17, houve aumento tanto nos valores de entrada quanto nos de saída, exceto em nitrogênio nitrito, nitrito e oxigênio dissolvido.

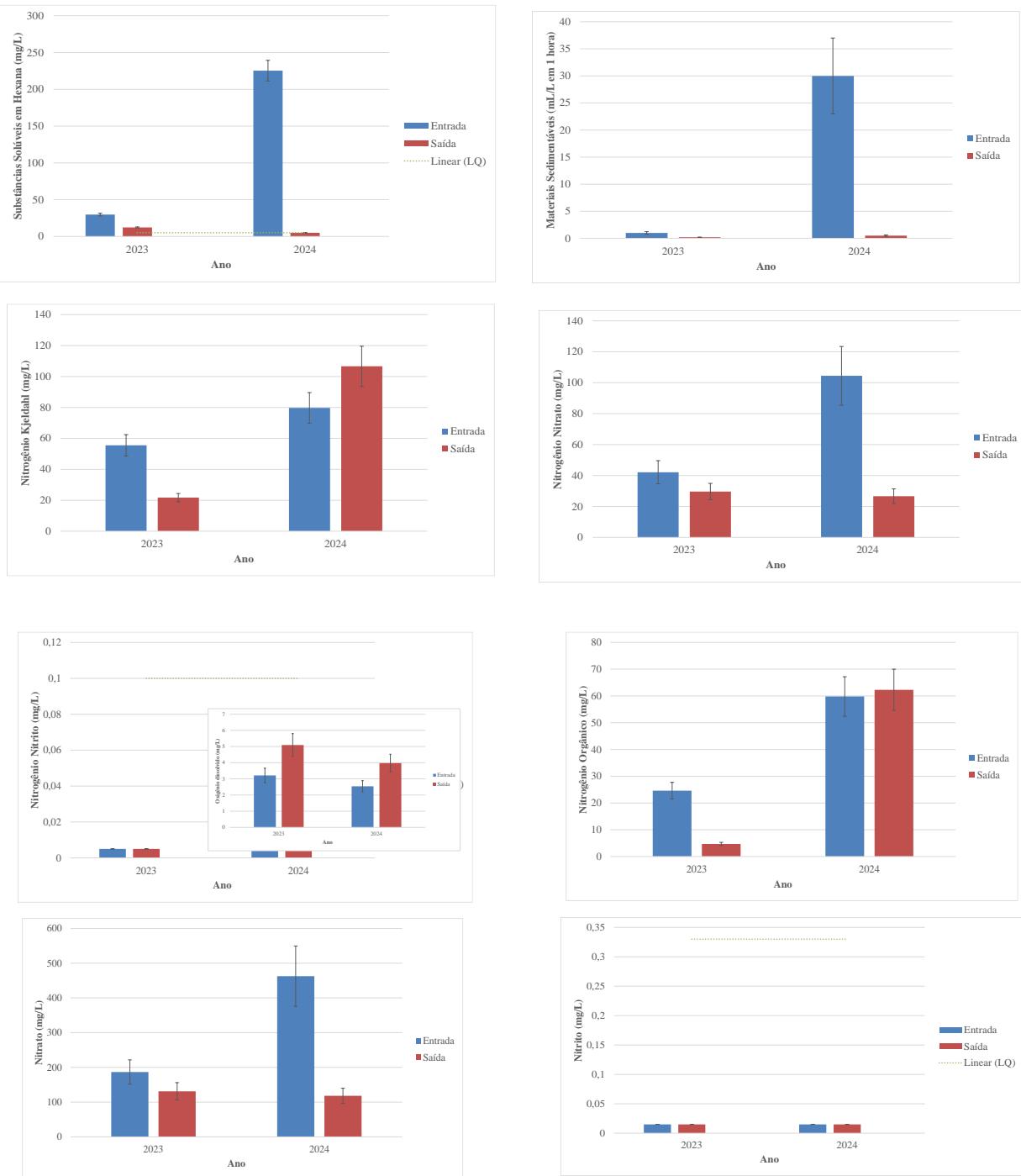


Figura 17 — Substâncias solúveis em hexano, materiais sedimentáveis, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio orgânico, nitrito e nitrito obtidas em amostras de esgoto coletado na entrada e saída da estação de tratamento de esgoto São Carlos, zona urbana, entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora.

A ETE São Carlos manifesta eficácia em diversos parâmetros, em especial na eliminação de DBO, DQO e compostos oleosos. Contudo, os altos índices de nitrogênio amoniacal e nitrato após o tratamento (saída) geram preocupação diante das análises. Esse resultado pode impactar negativamente o ecossistema aquático, favorecendo a eutrofização e a toxicidade. A empresa de saneamento e esgoto do município precisa concentrar esforços para melhorar os processos de remoção desses compostos de nitrogênio, a fim de cumprir integralmente as exigências ambientais e reduzir os efeitos nos corpos receptores.

3.3.4. Estação de tratamento de esgoto — Jardim Itália, zona urbana

A avaliação do desempenho do tratamento na ETE Jardim Itália com base na tabela apresentada propiciou a comparação dos dados de novembro de 2023 e janeiro de 2024. Foram avaliadas as concentrações totais de nitrogênio (entrada e saída), considerando as incertezas e os limites máximos permitidos pelas leis ambientais do Brasil (CONAMA n.º 430/11, Art. 16, e Dec. n.º 8.468/1976, Art. 18), dos Estados Unidos e da União Europeia. As medições foram expostas nas Tabelas 7, 8 e 9:

Tabela 7 — Comparação dos valores de entrada e saída do nitrogênio total, entre 2023 e 2024, nos limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia

PARÂMETROS	NORMATIVA		Limite legal
	Entrada	Saída	
Brasil (CONAMA n.º 430/2011 e 357/2005)	Novembro/2023: 145,7 mg/L (incerteza 28)	Novembro/2023: 48,25 mg/L (incerteza 9,1)	20 mg L ⁻¹
Estados Unidos (EPA)	Janeiro/2024: 292,4 mg/L (incerteza 55)	Janeiro/2024: 224,3 mg/L (incerteza 42)	10–15 mg L ⁻¹
União Europeia (Diretiva 91/271/CEE):			10 mg L ⁻¹

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 8 — Comparação dos valores de saída do nitrogênio total, em 2023, nos limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia

NORMATIVA — 2023			
PARÂMETROS	Valor de Saída: 48,25 mg L⁻¹	Limite legal	VALOR DE REFERÊNCIA
Brasil	Excede o limite por mais de 2,4 vezes	20	
EUA	Excede entre 3,2 e 4,8 vezes o limite	10–15	mg L ⁻¹
UE	Excede o limite por mais de 4,8 vezes	10	

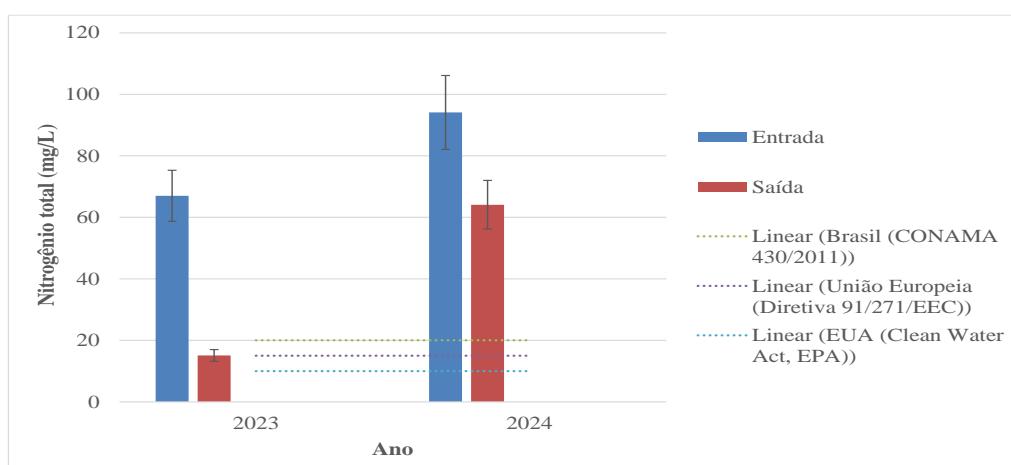
Fonte: elaborada pela autora.

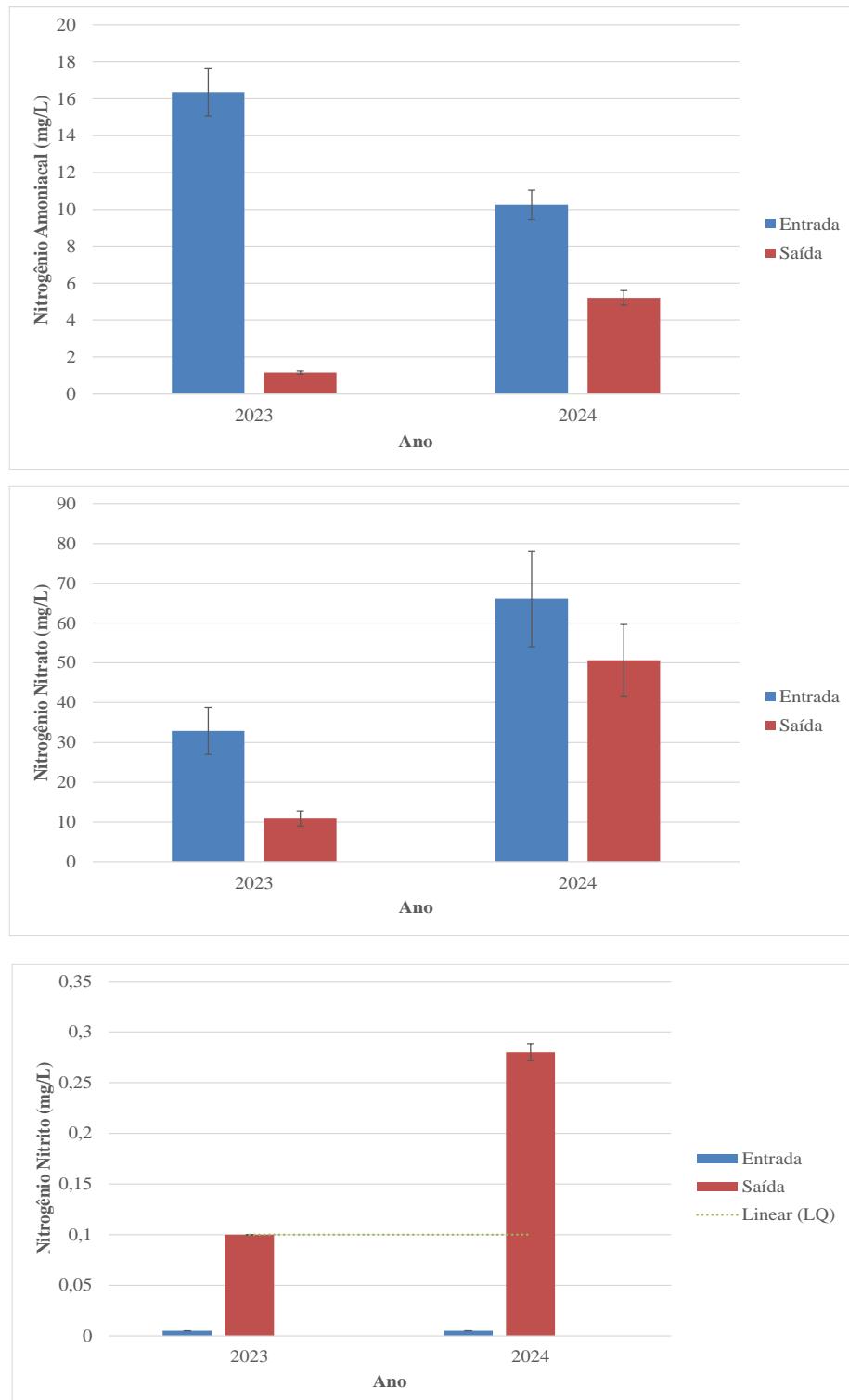
Tabela 9 — Comparação dos valores de saída nitrogênio total, ano 2024, limites das legislações brasileira, norte-americana e europeia

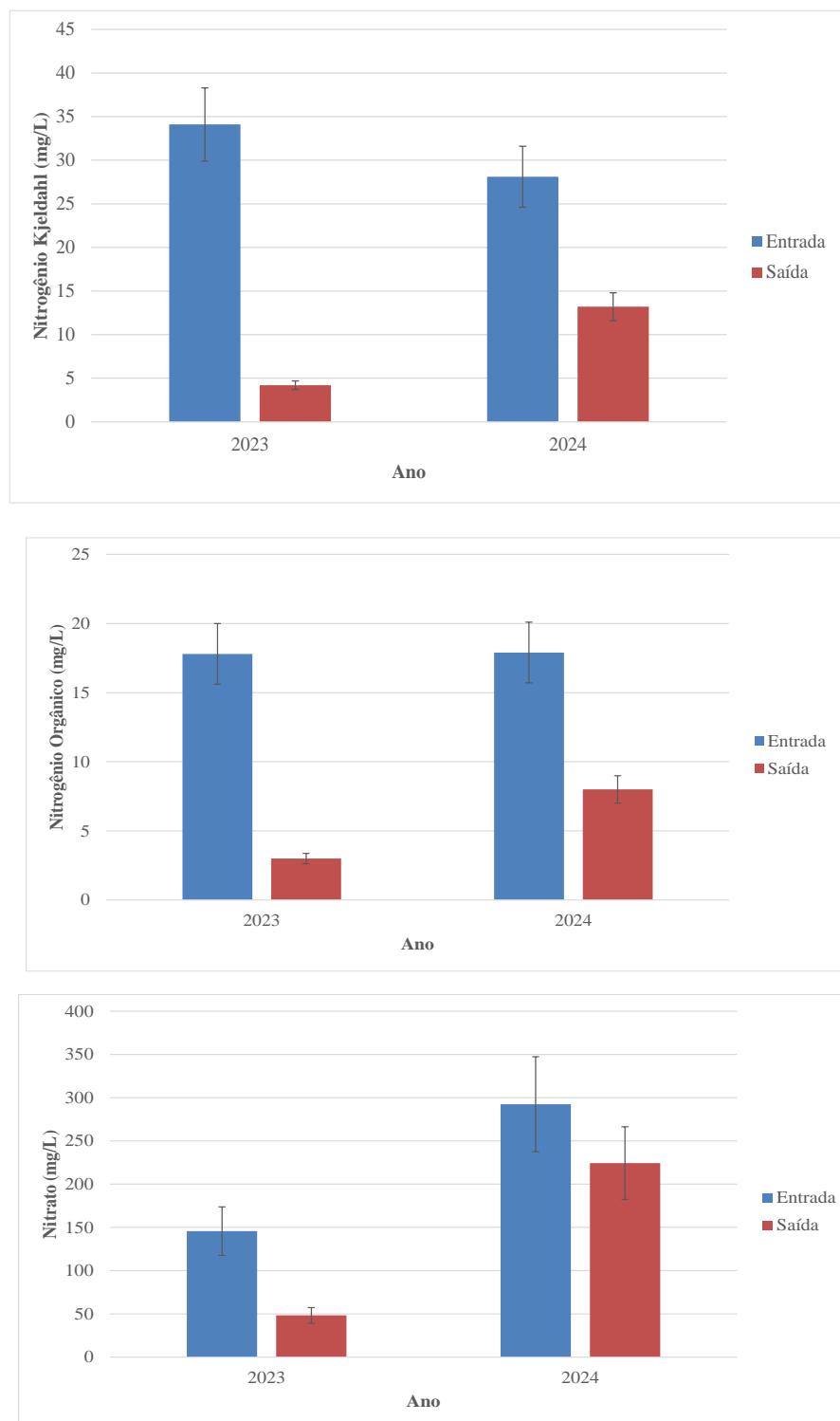
NORMATIVA — 2024			
PARÂMETROS	Valor de Saída: 224,3 mg/L	Limite legal	VALOR DE REFERÊNCIA
Brasil	Excede o limite por mais de 11 vezes	20	
EUA	Excede entre 14,9 e 22,4 vezes o limite	10–15	mg L ⁻¹
UE	Excede o limite por mais de 22 vezes	10	

Fonte: elaborada pela autora.

Com base nos dados fornecidos e considerando os limites máximos estabelecidos pelas legislações brasileira, europeia e norte-americana, as observações e críticas dos parâmetros nitrogenados são exibidas na Figura 18:







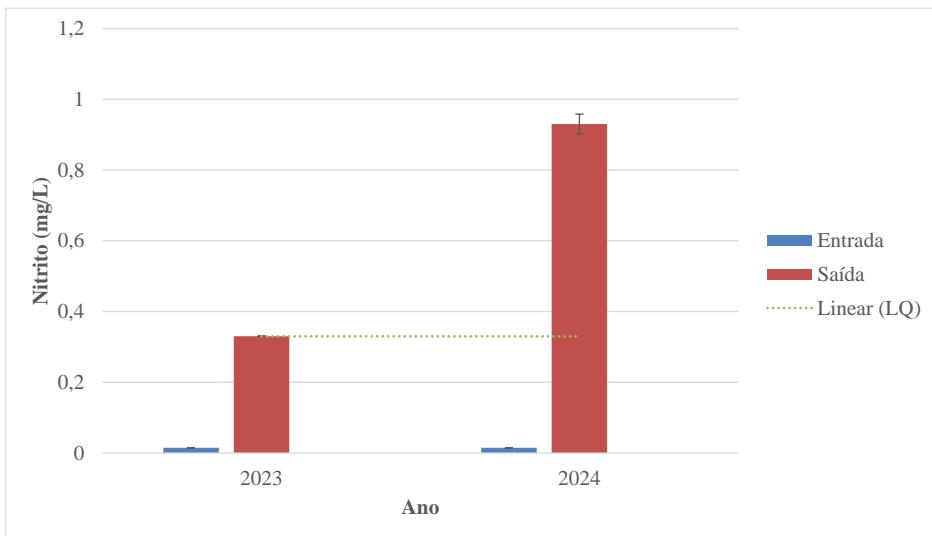


Figura 18 — Avaliação das formas nitrogenadas (nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio orgânico, nitrato e nitrito) entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

De acordo com a avaliação crítica, no período de 2023 a 2024, houve um aumento significativo da carga de entrada, de 100,6%, na concentração de nitrogênio total (145,7 para 292,4 mg L⁻¹), conforme a figura apresentada acima. Em decorrência disso, esse aumento pode ser atribuído a alguns fatores, como maior carga orgânica afluente, mudanças no perfil dos resíduos lançados no sistema e/ou condições climáticas que afetaram a diluição natural. Outro aspecto relevante, em 2024, quando foi coletado o material, é o período de chuvas e alagamentos.

No que se refere ao desempenho do sistema de remoção, em 2023, a eficiência de remoção foi de 66,9%, enquanto em 2024 a eficiência caiu para 23,3%, indicando problemas operacionais ou sobrecarga no sistema. Quanto à conformidade com as legislações brasileira, norte-americana e europeia, em 2023, o efluente já não atendia aos limites estabelecidos e, em 2024, a concentração da saída foi extremamente elevada, representando alto risco ambiental e indicando falhas graves no processo.

Em relação aos impactos potenciais, as altas concentrações de nitrogênio total na saída elevam o risco de eutrofização dos corpos receptores, ocasionando proliferação de algas tóxicas, redução do oxigênio dissolvido e prejuízos à fauna e à flora aquática. Portanto, sugere-se que seja feita a revisão do processo de tratamento, com base no aumento expressivo em 2024.

À luz dos estudos, recomenda-se o aprimoramento na eficiência da remoção de nitrogênio, implementando processos de nitrificação e desnitrificação mais robustos, além de

investigar a viabilidade de sistemas avançados, como reatores anammox ou tecnologias de remoção química. Também é importante identificar as causas do aumento na entrada com uma análise detalhada para determinar as fontes da maior carga de nitrogênio, como mudanças nas atividades industriais ou aumento populacional, conforme mencionado anteriormente.

Por fim, são necessários investimentos no sistema para lidar com as cargas mais elevadas, ajustes nos parâmetros operacionais, como tempo de retenção hidráulica, aeração e controle de pH e aumento no monitoramento do corpo receptor para avaliar os impactos causados pelos efluentes. As demais medidas de resolução incluem traçar planos de contingência para evitar danos maiores à qualidade da água, capacitar a equipe responsável pelo sistema para responder rapidamente às variações de carga, otimizar os processos de tratamento, o uso de tecnologias temporárias de polimento do efluente e o possível descarte controlado em locais de menor sensibilidade ambiental.

As informações apontam para uma situação preocupante e inviável no tratamento de nitrogênio total na ETE Jardim Itália, com valores que excedem consideravelmente os limites legais. A acentuada queda na eficiência, entre novembro de 2023 e janeiro de 2024, ressalta a necessidade imediata de ações técnicas, operacionais e administrativas para restabelecer a conformidade ambiental e reduzir os efeitos no ecossistema receptor.

3.3.5. Estação de tratamento de esgoto — Pedro Paschoal, zona urbana

As análises críticas das melhorias e pioras, entre 2023 e 2024, na ETE Pedro Paschoal são embasadas nas legislações brasileira (CONAMA, 2011), europeia (União Europeia, 1991) e norte-americana (EPA, 2023). Foram analisados os principais parâmetros de qualidade: DBO, DQO, substâncias solúveis em hexano, materiais sedimentáveis, fósforo total, nitrogênio (em diferentes formas), pH, oxigênio dissolvido e temperatura, cujas incertezas de medição iguais a “0” indicam que os valores estão no limite de quantificação analítica, conforme mostra a Figura 19.

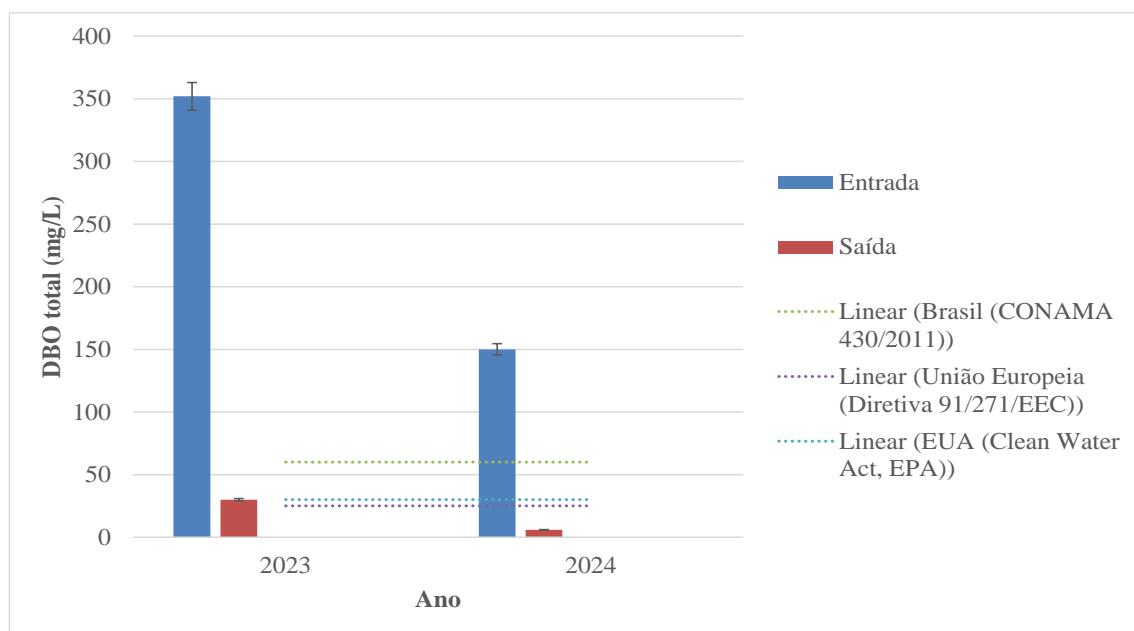


Figura 19 — Análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

No levantamento da DBO, observam-se os valores de $138 \pm 4,3$ em 2023, enquanto em 2024 encontram-se os valores de $44 \pm 1,4$. Devido a isso, nota-se a redução significativa na DBO (68,1%), a qual expõe a melhoria no tratamento biológico. Entretanto, o valor de 44 mg L^{-1} ainda excede os limites brasileiro e europeu de 30 mg L^{-1} para lançamento de efluentes em corpos d’água. Por outro lado, a legislação estadunidense aceita até $10\text{--}30 \text{ mg L}^{-1}$, dependendo da classificação do corpo hídrico receptor.

Os resultados coletados dos materiais sedimentáveis, em 2023, foram de $6,81 \pm 0,16$; em 2024, $7,45 \pm 0,17$. Seguindo os mesmos critérios de análise, ampliaram-se os materiais sedimentáveis (9,4%), ultrapassando o limite máximo de 1 mL/L definido pelo CONAMA e pelas legislações internacionais. O resultado, visualizado pela Figura 20, demonstra a necessidade de melhorias no pré-tratamento ou na remoção de sólidos em suspensão.

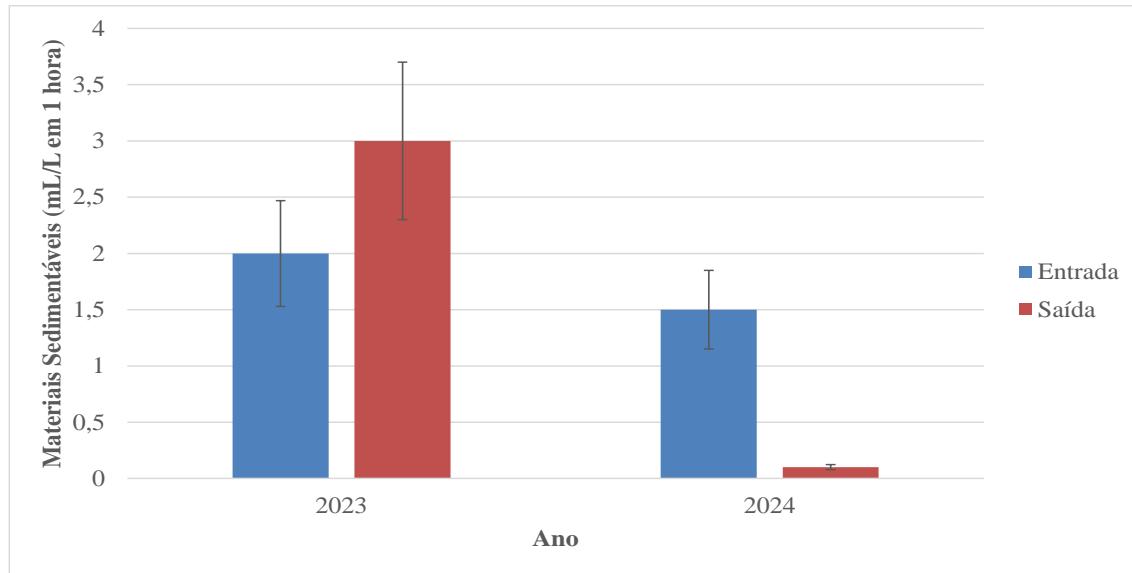


Figura 20 — Análise dos materiais sedimentáveis entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

A concentração de nitrogênio amoniacal (Figura 21) foi reduzida em 51,8%, mas o valor de 4 mg L^{-1} ainda extrapola os limites europeu e estadunidense de 1 mg L^{-1} para corpos d'água sensíveis, cujos valores para o ano de 2023 foram de $8,3 \pm 1$; em 2024, de $4 \pm 0,5$.

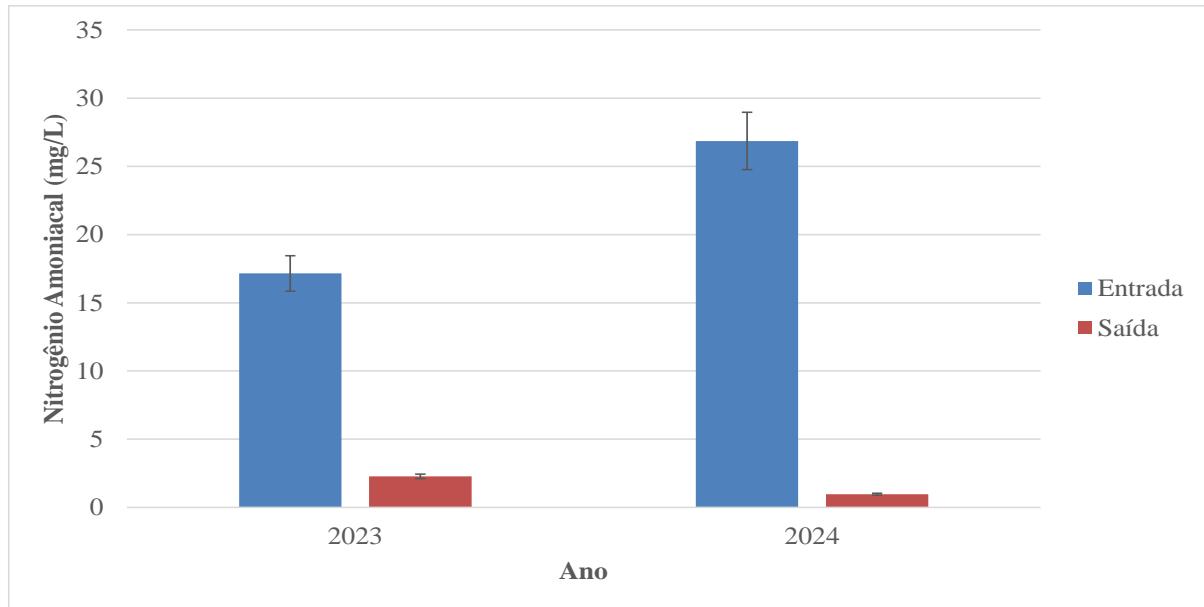


Figura 21 — Análise do nitrogênio amoniacal (NH_3) entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

Os parâmetros do nitrogênio total, em 2023, estavam com base de valor de $26 \pm 3,2$; em 2024, de $11,4 \pm 1,4$. Com isso, a redução foi significativa (56,2%), e o valor de $11,4 \text{ mg L}^{-1}$

cumpre o limite brasileiro de 20 mg L^{-1} , mas ainda excede o padrão europeu de 10 mg L^{-1} , como sinalizado na Figura 22.

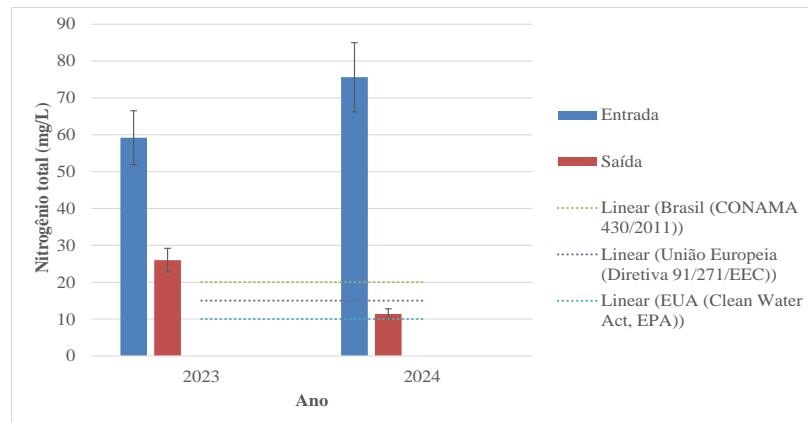


Figura 22 — Análise do nitrogênio total entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

O oxigênio dissolvido (Figura 23) exibe uma pequena redução, pois em 2023 apresentou $5,09 \pm 0,71$ e, em 2024, $4,3 \pm 0,6$. Entretanto, os valores permaneceram acima do mínimo de 2 mg L^{-1} , o suficiente para manter a fauna aquática.

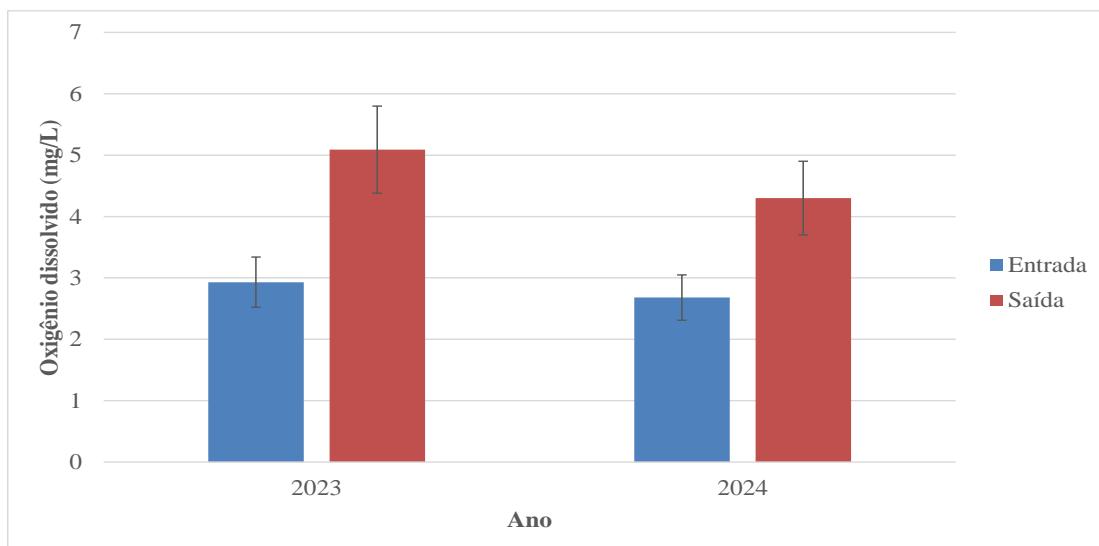


Figura 23 — Análise do oxigênio dissolvido entre 2023 e 2024. **Fonte:** elaborada pela autora

Os parâmetros analisados na Figura 24 — demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio total, nitrato, nitrito e substâncias solúveis em hexano — mostraram reduções na eficiência dos tratamentos biológico e químico.

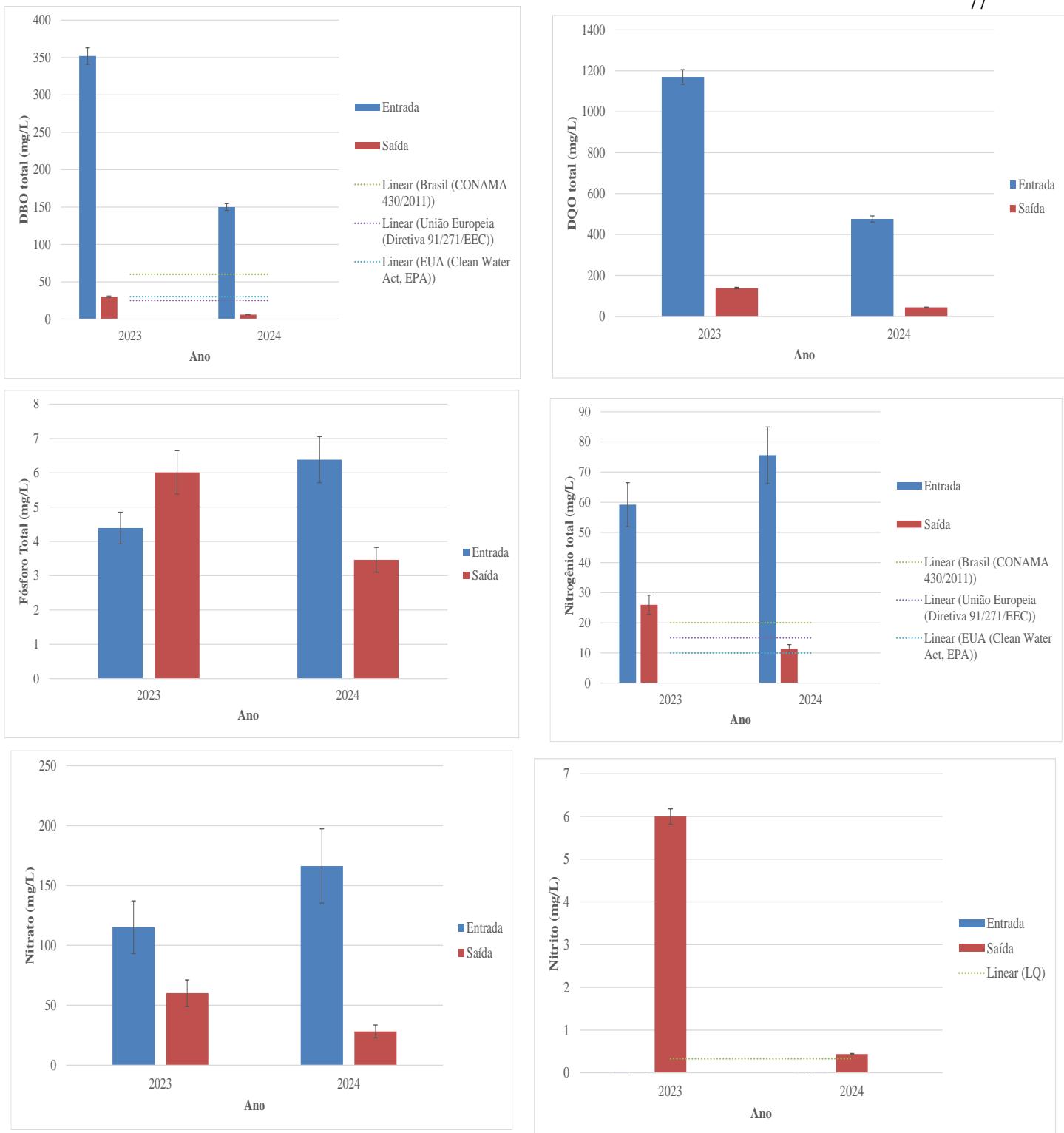


Figura 24 — Parâmetros que apresentaram melhorias na eficiência dos tratamentos biológico e químico. **Fonte:** elaborada pela autora

Propõe-se o aperfeiçoamento do tratamento físico com a intenção de refinar a remoção de sólidos sedimentáveis na etapa primária ou secundária, otimizar a etapa do processo

biológico, intensificando os processos de nitrificação e desnitrificação, e, assim, obter resultados positivos na extração de nitrogênios amoniacal e total. Há de ter compromisso também no monitoramento regular para controlar a DBO, os materiais sedimentáveis e o nitrogênio amoniacal, bem como considerar tecnologias como biofiltração ou processos terciários para alcançar os padrões mais rigorosos.

A ETE Pedro Paschoal reuniu aprimoramentos expressivos em parâmetros-chave, como DBO, DQO, fósforo e nitrogênio total, refletindo avanços no tratamento entre os anos de 2023 e 2024. Contudo, desafios persistem, especialmente em relação aos materiais sedimentáveis e ao nitrogênio amoniacal, que continuam exigindo atenção para atender às legislações mais restritivas.

3.5. Discussão

A DBO mede a quantidade de oxigênio necessário para que microrganismos aeróbicos decomponham a matéria orgânica presente no efluente em um determinado período de tempo, geralmente cinco dias. Quando há diminuição da DBO, significa menor concentração de matéria orgânica biodegradável na água, o que indica menor carga poluente e água de melhor qualidade.

Quando há redução da DBO, é um sinal de que o efluente tratado possui menor quantidade de matéria orgânica e pode ser decomposto biologicamente. Por outro lado, analisando o significado prático, essa menor carga de matéria orgânica resultará em menor impacto ambiental ao ser despejada em rios ou lagos, com menos consumo de oxigênio por microrganismos, o que ajudaria a evitar a morte de peixes e outros organismos aquáticos.

A DQO mede a quantidade de oxigênio necessário para oxidar quimicamente toda a matéria orgânica presente no efluente, seja ela biodegradável ou não. Essa relação inclui a matéria orgânica decomposta biologicamente e os compostos químicos mais complexos, que requerem agentes químicos para serem oxidados. A redução da DQO indica que o tratamento do efluente foi eficiente na remoção de compostos orgânicos, incluindo aqueles de difícil biodegradação. Na prática, isso significa que o efluente está mais limpo em termos de compostos químicos e menos agressivo ao ambiente receptor, visto que menor quantidade de oxigênio será consumida para oxidar essas substâncias na natureza.

Em síntese, a diminuição da DBO indica a presença de menor matéria orgânica

biodegradável. Já a diminuição da DQO representa uma redução na quantidade total de matéria orgânica, incluindo componentes que não são facilmente biodegradáveis. Diante disso, ambas as reduções são essenciais para melhorar a qualidade do efluente e minimizar o impacto ambiental ao ser lançado em corpos d'água. Por outro lado, em janeiro de 2024, na avaliação dos resultados da ETE Turvínia, considerando os limites máximos estabelecidos pelas legislações ambientais (CONAMA, 2011; Brasil, 1976), ressaltam-se os seguintes pontos:

O valor de DBO na saída (4 mg/L) está abaixo do limite de 60 mg/L, o que indica que a ETE Turvínia realiza remoção eficiente de matéria orgânica biodegradável, cumprindo os requisitos legais e reduzindo o potencial de depleção de oxigênio no corpo hídrico receptor. Embora a legislação não estabeleça um limite específico para DQO, a redução significativa desse parâmetro indica remoção eficaz de compostos orgânicos e inorgânicos. Esse resultado reflete a boa qualidade do efluente final, minimizando o impacto poluente.

Autores como Giacomelli (2022) apontam em seus estudos que a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é um indicador do nível de substâncias orgânicas no esgoto, e sua avaliação está ligada às condições de fornecimento de água em cada área. Em relação aos resultados da DQO, Cunha (2011) afirma que esse parâmetro é um indicador que mede a quantidade de matéria orgânica no corpo de água, podendo ser combinado com a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) para oferecer uma visão mais abrangente da qualidade da água.

Menezes *et al.* (2015) destacam que a quantidade total de resíduos no substrato está relacionada à concentração de sólidos totais, a qual é usada como indicadora da quantidade total de material a ser tratado. Barszcz *et al.* (2019) relatam que, com base na concentração de íons de hidrogênio, a água pode ser categorizada como ácida, neutra ou alcalina. A alteração do pH pode estar relacionada ao aumento na desnitrificação, processo que eleva a alcalinidade do efluente, uma vez que consome íons H⁺. Nos resultados apresentados nesta pesquisa, o pH, em várias estações de tratamento, estava ácido.

Contudo, a classificação do pH estabelece uma escala que oscila entre 0 e 14, significando que, quanto mais próxima de zero, mais ácida será a água e, quanto mais próxima de 14, mais alcalina (Von Sperling, 2005). O parâmetro do nitrogênio é um importante nutriente para o metabolismo dos ecossistemas aquáticos. No entanto, quando em excesso, pode levar à eutrofização da água, caracterizada pelo crescimento exagerado de algas e plantas aquáticas, além da diminuição do nível de oxigênio dissolvido. A eutrofização pode ser provocada pela liberação de efluentes com alta concentração de matéria orgânica e minerais.

Nesse contexto, é importante salientar que o nitrogênio nos corpos d'água pode manifestar-se como nitrogênio orgânico, amoniaco, nitrito e nitrato. Os nitratos são prejudiciais à saúde humana e, em níveis elevados, podem provocar uma doença fatal chamada metaemoglobinemia infantil (Von Sperling, 2018). Além disso, devido à ação da eutrofização, pode levar à mortandade de peixes e algas, afetando toda a cadeia alimentar (CETESB, 2017; ANA, 2021).

Segundo Silva e Araújo (2003), a alta concentração de nitrato indica contaminação por efluentes domésticos e industriais, bem como pelo uso de fertilizantes agrícolas. Isso indica que a origem da poluição está distante do local da amostra, uma vez que o nitrato é o resultado da oxidação do nitrogênio. A pesquisa de Cunha (2011) corrobora a questão da eutrofização das formas de nitrogênio. O nitrogênio total Kjeldahl avalia o volume total de nitrogênio orgânico e amônia em um corpo hídrico.

O excesso de nitrogênio resulta em eutrofização, crescimento exagerado de algas que pode provocar a extinção de rios e lagos. A amônia livre na água é prejudicial à vida aquática, e as diversas formas de nitrogênio sinalizam diferentes níveis de poluição. As formas orgânicas e a amônia indicam poluição recente, enquanto o nitrito e o nitrato sinalizam poluição mais antiga.

Os altos níveis de fósforo nos esgotos e efluentes industriais podem levar à eutrofização de corpos de água naturais, provocando redução significativa nos níveis de oxigênio dissolvido na água. Isso ocorre porque as bactérias que participam da decomposição da matéria orgânica consomem oxigênio, causando a morte de peixes e outros seres aquáticos (Cunha, 2011).

Para a análise do oxigênio dissolvido (OD), ocorre o processo de decomposição de resíduos orgânicos por meio de digestão aeróbia, que é auxiliada pelo oxigênio presente no meio ambiente. Este procedimento decompõe compostos orgânicos, produzindo subprodutos como o biossólido, conhecido como lodo, o dióxido de carbono e a água (Braga *et al.*, 2023).

Por fim, Menezes *et al.* (2012) ressaltam que a temperatura tem impacto direto em todas as atividades físico-químicas e biológicas que ocorrem na água, visto que afeta o metabolismo dos microrganismos, altera as velocidades de reação enzimática e leva à desnaturação de proteínas e enzimas.

3.6. Conclusão

Para minimizar os impactos no córrego e nas comunidades do entorno, é essencial averiguar e caracterizar o efluente das estações de tratamento de esgoto (ETEs) do município de Bebedouro/SP, considerando variações espaciais e temporais. Nesse sentido, torna-se uma premência adotar medidas corretivas imediatas focadas no incremento da qualidade do efluente tratado, na proteção do corpo hídrico receptor e na sensibilização e conscientização da população.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Gestão de águas:** política nacional de recursos hídricos. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 5 jan. 2025.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 23. ed. Washington: APHA, 2017.

ARAÚJO JÚNIOR, J. C. M. D. Impactos da presença humana no ecossistema do Riacho Doce, litoral norte do estado de Pernambuco. **Educação Ambiental (Brasil)**, v. 1, n. 2, p. 51-63, 2020. Disponível em: <https://www.educacaoambientalbrasil.com.br/index.php/EABRA/article/view/17>. Acesso em: 12 fev. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9898:** preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 1987. Disponível em: https://sistema.ceteclins.com.br/Uploads/PDF/B8E15D63-B64B-4106-81AB-0E807999C6DD_29012020115558.pdf. Acesso em: 14 maio 2024.

AZEVEDO, P. G. F. de; OLIVEIRA, D. C. da S.; CAVALCANTI, L. A. P. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 17, p. 1667-1678, 2020. Disponível em: <http://revista.ecogestaobrasil.net/v7n17/v07n17a40a.html>. Acesso em: 14 maio 2024.

BARSZCZ, L. B. et al. Avaliação ecotoxicológica de efluentes tratados por alagados construídos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1147-1156, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019184120>. Acesso em: 14 maio 2024.

BRAGA, D. S. et al. Tratamento de efluentes: sistemas convencionais e avançados, desafios e perspectivas para a sustentabilidade. **Ciências e Tecnologia das Águas: Inovações e Avanços em Pesquisa**, Guarujá, v. 1, p. 306-319, 2023. Disponível em: <https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/230312599.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 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. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em:
https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 15 maio 2024.

BRASIL. Decreto n.º 8.468, de 8 de setembro de 1976. Dispõe sobre o regulamento para o controle da poluição causada por lançamento de efluentes líquidos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 11867-11869, 09 set. 1976. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>. Acesso em: 15 maio 2024.

CADORIN, G. R. *et al.* Parâmetros significativos para monitoramento e avaliação da qualidade da água, bacia hidrográfica do rio Cachoeira (Joinville, Santa Catarina, Brasil). **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 2023, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/797>. Acesso em: 14 maio 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Apêndice E:** significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%A9ndice-E-Significado-Ambiental-e-Sanit%C3%A1rio-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade-2016.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n.º 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente — CONAMA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 92, 16 maio 2011. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/publicacoes/245-resolucao/185-conama-n-430-de-2011?layout=publicacoes>. Acesso em: 15 maio 2024.

CUNHA, B. M. **Avaliação ecotoxicológica de distintos tipos de efluentes mediante ensaio de toxicidade aguda utilizando *Artemia salina* e *Lactuca sativa***. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32773>. Acesso em: 15 maio 2024.

FERREIRA, D. F. **Sistema para análise de variância para dados balanceados (SISVAR)**. Versão 4.3. Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, 2003. Software registrado™.

GARRISON, T. **Essentials of oceanography**. Boston, MA: Cengage Learning, 2012.

GIACOMELLI, S. M. **Comparativo entre dados reais e sugeridos pela literatura de parâmetros de DBO para dimensionamento de estações de tratamento de esgoto nas regiões Sul e Nordeste do Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/46127>. Acesso em: 1 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do Censo 2022.** Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 14 maio 2024.

KARYDIS, M.; KITSIOU, D. Marine water quality monitoring: a review. **Mar. Pollut. Bull.** v. 77, n. 2, p. 23-36. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X13005481>. Acesso em: 14 maio 2024.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MENEZES, J. M. C. *et al.* Influence of temperature on the anaerobic stabilization of organic solid residues. **African Journal of Biotechnology**, v. 14, n. 6, p. 500-508, 2015.

SANTOS, S. A. dos *et al.* Qualidade da água na bacia hidrográfica urbana Cancela Tamandaí, Santa Maria/RS. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 2, p. 23-44, 2018.

SHUKLA, D. P.; VAGHELA, K. B.; JAIN, N. Assessment of physico-chemical and bacteriological water quality parameters: a review. **International Journal of Pharmacy and Integrated Life Sciences**, v. 5, n. 2. p. 1-17, 2017.

SILVA, M. A.; ARAÚJO, R. R. de. Análise temporal da qualidade da água no córrego limoeiro e no rio Pirapozinho no estado de São Paulo – Brasil. **Revista Formação (ONLINE)**, v. 1, n. 24, p. 182-203, 2017. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/formacao/article/view/4656>. Acesso em: 15 maio 2024.

SILVA, R. C. A.; ARAÚJO, T. M. Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA). **Ciênc. Saúde Coletiva**. São Paulo, v. 8, n. 4, p. 1019-1028, 2003.

SOUZA, A. C. A.; GOMES, J. P. Desafios para o investimento público em saneamento no Brasil. **Revista Saúde em Debate**, Rio de Janeiro, v. 43, n. spe7, p. 36-49, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-11042019s703>. Acesso em: 9 fev. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Conselho das Comunidades Europeias. **Diretiva 91/271/CEE, de 21 de maio de 1991.** Relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JOCE), L 135, p. 40-52, 30 maio 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES).** Washington: EPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 9 jan. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

CAPÍTULO 4 — CARACTERÍSTICAS FÍSICA E QUÍMICA, E TEOR DE METAIS PESADOS DO BIOSSÓLIDO PROVENIENTE DA DISPOSIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETES)

RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar as características física e química, bem como o teor de metais pesados do biossólido gerado em estações de tratamento de esgoto (ETEs), além de indicar seu potencial de reaproveitamento na agricultura, segundo normas ambientais vigentes. Para tanto, foram analisados parâmetros como granulometria, fertilidade, concentração de nutrientes (fósforo, cálcio, magnésio) e presença de metais pesados (chumbo, cádmio, cromo), comparando os resultados com as legislações brasileira (CONAMA n.º 375/2006), europeia (Diretiva 86/278/CEE) e norte-americana (40 CFR Parte 503). A coleta de dados ocorreu por laboratórios acreditados (ISO/IEC 17025), considerando a incerteza de medição para garantir a confiabilidade dos resultados. A análise comparativa com as legislações evidenciou que os biossólidos rurais são mais adequados para uso agrícola, com pH neutro (6.5–7.0) e baixa carga contaminante, enquanto os urbanos exigem tratamento prévio — especialmente para remoção de fenóis (oxidação avançada) e metais pesados (adsorção/precipitação química). Conclui-se que a aplicação agrícola é viável, desde que submetida a: (i) monitoramento contínuo de metais pesados; (ii) ajuste de pH em biossólidos ácidos (ex.: ETE Botafogo, pH 5); e (iii) controle de fontes industriais para reduzir a carga contaminante. O estudo reforça a necessidade de políticas públicas para regulamentar o uso seguro desse resíduo, alinhando sustentabilidade agrícola e proteção ambiental.

Palavras-chave: biossólido; fertilidade do solo; metais pesados.

4.1. Introdução

A gestão adequada dos resíduos gerados em estações de tratamento de esgoto (ETEs) constitui-se como um dos desafios ambientais mais relevantes da atualidade, especialmente no que tange ao biossólido, um subproduto rico em matéria orgânica e nutrientes, mas que pode conter contaminantes que representam riscos ao meio ambiente e à saúde humana. Esse material é resultante do processo de tratamento de efluentes domésticos e industriais, e sua composição física, química e biológica varia conforme as características do esgoto tratado e dos métodos de tratamento aplicados.

Devido assim, tem-se como fundamental uma investigação desse material para determinar seu potencial de reaproveitamento, especialmente na agricultura, onde pode ser utilizado como fertilizante orgânico, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo e a redução do uso de fertilizantes químicos. No entanto, metais pesados e outros contaminantes no biossólido exigem avaliação criteriosa, pois o uso inadequado pode levar à contaminação do solo, da água e dos alimentos (Silva, 2023).

Analizar a característica física do biossólido de esgoto envolve a avaliação de parâmetros como granulometria, teor de sólidos totais e umidade, que influenciam diretamente sua aplicabilidade no solo. A granulometria, por exemplo, determina a textura do lodo e sua capacidade de retenção de água e nutrientes, aspectos importantes para solos arenosos ou argilosos. Já a análise química concentra-se na quantificação de nutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, que podem melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento vegetal.

O teor de matéria orgânica no biossólido contribui para a estruturação do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e a atividade microbiana, fatores essenciais para a sustentabilidade agrícola (Saraiva, 2017). Pode-se dizer que a análise de metais pesados é um aspecto crítico na avaliação do biossólido de esgoto, uma vez que esses elementos, como chumbo, cádmio, cromo e mercúrio, podem acumular-se no solo e nas plantas, representando riscos à saúde humana e ao ecossistema.

A existência desses metais está frequentemente associada a efluentes industriais que chegam às ETEs, e sua concentração deve ser rigorosamente monitorada para garantir que o biossólido atenda aos limites estabelecidos pelas normas ambientais, como a Resolução CONAMA n.º 375/2006 no Brasil, a Diretiva 86/278/CEE na Europa e a 40 CFR Parte 503 nos

Estados Unidos. Essas legislações estabelecem parâmetros máximos para a concentração de metais pesados e outros contaminantes no biossólido, visando garantir sua segurança para uso agrícola ou disposição final (Sampaio, 2013). Nesse cenário, a pesquisa pretende avaliar as qualidades química e física, e os metais pesados do biossólido proveniente da disposição das estações de tratamento de esgoto entre os anos de 2023 e 2024, nas ETEs rurais e urbanas do município de Bebedouro/SP.

4.2. Material e método

Os dados foram obtidos a partir de análises realizadas por laboratórios parceiros acreditados pela ISO/IEC 17025 (2017). As incertezas de medição foram consideradas nas avaliações dos resultados, ou seja, a variabilidade dos resultados das medições foi considerada na avaliação da conformidade destes.

As incertezas dos resultados iguais ou abaixo dos limites de quantificação dos procedimentos de medição são iguais a zero (0). A avaliação crítica considerou as melhorias ou pioras entre os anos de 2023 e 2024 no tratamento de esgoto das estações. As análises foram efetuadas nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) Botafogo, Turvínia (zona rural), São Carlos, Pedro Paschoal, Mandembo e Jardim Itália (zona urbana).

Considerou-se verificar e comparar os parâmetros críticos com base nas principais legislações vigentes: brasileira (CONAMA n.º 430/2011), europeia (Diretiva 91/271/CEE) e norte-americana (EPA). Os dados foram comparados utilizando ferramentas, como gráficos de barras disponíveis no software Microsoft Excel 365®. De acordo com a ISO/IEC 17025 (2017), a incerteza de medição é a maneira de dizer quão preciso e confiável é o resultado de uma medição.

Isso significa que, mesmo usando os melhores equipamentos e técnicas, sempre há margem de dúvida sobre o valor exato que está sendo medido. Essa margem é expressa como um intervalo, indicando os limites dentro dos quais o valor real deve estar. É como dizer: “O resultado é X, mas pode variar para mais ou para menos.”

De modo geral, é importante conhecer a incerteza de medição para entender o quanto se pode confiar no resultado obtido. No caso de um laboratório de análises, isso significa garantir que os resultados sejam consistentes e úteis para tomar decisões, como verificar se o material analisado segue as normas ambientais.

Quando um laboratório é acreditado pela ISO/IEC 17025 (2017), significa que segue

uma normativa de padrões internacionais de qualidade para realizar medições e testes. Especificamente no caso de laboratórios que analisam água de distribuição, biossólido e efluentes, a acreditação garante dois pontos cruciais, listados no Quadro 5:

Quadro 5 — Importância da acreditação de laboratórios de análises pela ISO/IEC 17025

Pontos importantes para a acreditação da ISO/IEC 17025	
Confiabilidade	Métodos empregados para medir seguem padrões rigorosos, aumentando a certeza de que os resultados refletem a realidade.
Rastreabilidade	Todas as medições são correlacionadas aos padrões internacionais de referência, comprovando a validade dos resultados, ponto essencial para órgãos reguladores e clientes.

Fonte: ISO/TEC 17025 (2017), adaptado pela autora.

Em síntese, o laboratório de análises com selo ISO/IEC 17025 (2017) transmite confiabilidade e segurança de boas práticas, assegurando que seus resultados são corretos, precisos e reconhecidos em qualquer lugar do mundo. Para a instituição que necessita de análises, como indústrias, órgãos ambientais, pesquisadores e outros, significa redução de risco de decisões erradas baseadas em dados duvidosos.

A Figura 25 exibe a comparação entre o valor medido de nitrito-N (1,01 mg/L) e o limite máximo permitido pela legislação (1,00 mg/L). A faixa azul indica a incerteza de medição ($\pm 0,05$ mg/L), mostrando que o resultado pode variar entre 0,96 e 1,06 mg/L.

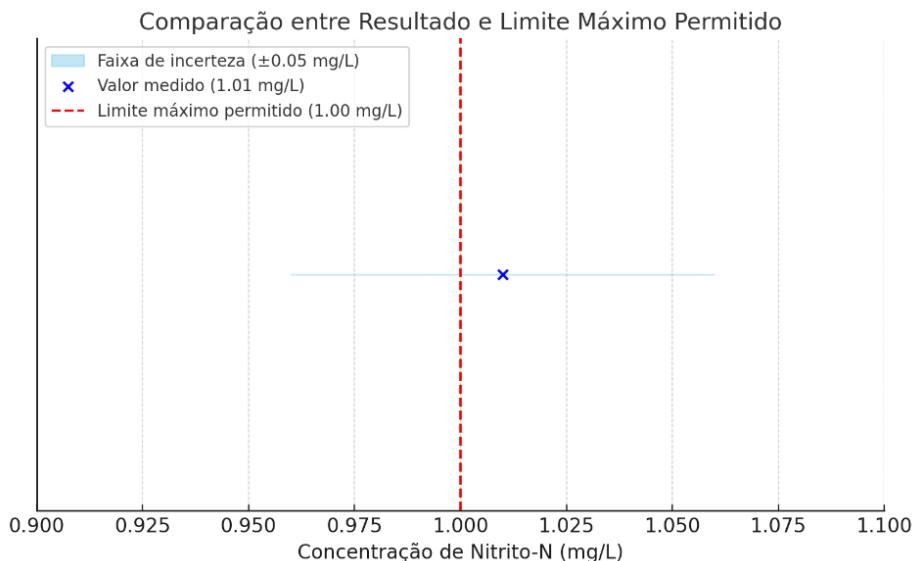


Figura 25 — Comparação entre resultado e limite máximo permitido de concentração de nitrito-N (mg/L)

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Análises química, física e de micronutrientes

Nas Tabelas 10, 11 e 12, localiza-se a avaliação das análises química e física, e de micronutrientes detalhada das estações de tratamento de esgoto (ETEs), ressaltando as vantagens do biofertilizante gerado e suas possíveis utilizações com base nas variáveis examinadas:

Tabela 10 — Resultados de análise química das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana

Resultado de Análise Química														
Cod. Lab.	Descrição Amostra	pH	P(res)	P(M-1)	S-SO ₄ ²⁻	Si	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al ³⁺	MO	CO
		-	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³						g dm ⁻³	
1900	ETE Botafogo distr.1 P1	6,7	ns	305,1	93	ns	0,2	434	20	2,01	3,0	15	412	239,0
1906	ETE Urbano - São Carlos	6,8	ns	320,2	422	ns	4,5	229	44	5,54	0,4	15	385	223,4
1902	ETE Turvinia distr.2 P1	6,8	ns	354,2	204	ns	2,4	469	26	1,30	1,8	16	483	280,3
1903	ETE Turvinia distr.2 P2	4,7	ns	351,6	167	ns	1,7	96	20	0,61	0,7	108	290	168,3
1904	ETE Urbano - Jd. Italia	5,9	ns	280,2	65	ns	4,5	185	30	0,78	1,6	60	323	187,2
1905	ETE Urbano - Jd. Pedro Pascoal	5,2	ns	531,8	33	ns	2,5	192	20	0,14	2,1	33	352	204,5

Tabela 11 — Resultados complementares de análise química das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana

Resultados Complementares												
Cod. Lab.	Descrição Amostra	SB	CTC	V	m	Ca/CTC	Mg/CTC	K/CTC	H+Al/CTC	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
		mmol _c dm ⁻³		%			%			Relações		
1900	ETE Botafogo distr.1 P1	456,2	470,8	97	1	92	4	0	3	21,7	2170,0	100,0
1901	ETE Botafogo distr.1 P2	441,0	457,4	96	0	91	5	0	4	19,9	4170,0	210,0
1902	ETE Turvinia distr.2 P1	498,7	514,2	97	0	91	5	0	3	18,0	195,4	10,8
1903	ETE Turvinia distr.2 P2	118,3	226,8	52	1	42	9	1	48	4,8	56,5	11,8
1904	ETE Urbano - Jd. Italia	220,3	280,5	78	1	66	11	2	22	6,2	41,1	6,7
1905	ETE Urbano - Jd. Pedro Pascoal	214,6	248,0	86	1	77	8	1	14	9,6	76,8	8,0
1906	ETE Urbano - São Carlos	283,0	298,1	95	0	77	15	2	5	5,2	50,9	9,8

Tabela 12 — Resultados de micronutrientes e análise física das estações de tratamento de esgoto das zonas rural e urbana

Cod. Lab.	Descrição Amostra	Resultados de Micronutrientes					Resultados de Análise Física					
		B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Argila	Silte	Classificação Textura:
		mg dm ⁻³					g Kg ⁻¹					
1900	ETE Botafogo distr.1 P1	1,39	5,1	309	11,3	25,6	ns	ns	116	547	337	Argilosa
1901	ETE Botafogo distr.1 P2	1,82	7,0	412	14,3	29,6	ns	ns	114	600	286	Argilosa
1902	ETE Turvinia distr.2 P1	3,08	53,6	201	4,4	44,0	ns	ns	280	430	290	Argilosa
1903	ETE Turvinia distr.2 P2	7,88	69,6	424	30,2	53,2	ns	ns	260	486	254	Argilosa
1904	ETE Urbano - Jd. Italia	9,83	21,8	281	32,7	46,4	ns	ns	186	415	399	Argilosa
1905	ETE Urbano - Jd. Pedro	12,46	22,7	238	30,5	51,2	ns	ns	228	417	355	Argilosa
1906	ETE Urbano - São Carlos	8,03	7,1	484	18,3	35,6	ns	ns	100	510	390	Argilosa

4.3.2. Estação de tratamento de esgoto do distrito de Botafogo, zona rural

Como apresentado abaixo (Quadro 6), verifica-se que o material coletado no ponto 1 possui potencial de aplicação para melhoria de solos argilosos.

Quadro 6 — Representação da análise dos pontos 1 e 2 coletados da ETE Botafogo, zona rural

Nutrientes	P1	P2	Potencial P1	Potencial P2
Matéria orgânica	412 g/kg	555 g/kg	Melhorar a estrutura de solo com baixa atividade biológica ou com baixa matéria orgânica	Melhorar a estrutura do solo, a retenção de água e a atividade biológica
Fósforo	305,1 mg/kg	265,5 mg/kg	Desenvolvimento de raízes e estrutura do solo	Essencial para nutrição de plantas
Cálcio	434 mg/kg	417 mg/kg	Desenvolvimento de raízes e estrutura do solo	Essencial para nutrição de plantas
Magnésio	20 mg/kg	21 mg/kg	Desenvolvimento de raízes e estrutura do solo	Essencial para nutrição de plantas
pH	6,7	6,5	Ideal para vários tipos de vegetações/plantas	Ideal para vários tipos de vegetações/plantas

O conteúdo de cálcio e magnésio pode ser especialmente útil em solos argilosos, promovendo a floculação e melhorando a drenagem. Da mesma forma, a boa concentração de fósforo e cálcio pode ser aproveitada em cultivos agrícolas que exijam esses nutrientes.

Analisando o ponto 2, ele é recomendado para a fertilização de solos com baixa quantidade de fósforo, isto é, para aumentar os níveis de fósforo em solos que apresentem deficiências desse nutriente, como solos de baixo rendimento agrícola. Além disso, indica-se para a melhoria de solos argilosos e arenosos, fomentando a retenção de água e aprimorando a estrutura do solo.

4.3.3. Estação de tratamento de esgoto do distrito de Turvínia, zona rural

Conforme apresentado no quadro 7, a análise mostra que os nutrientes abaixo descritos podem ser utilizados na recuperação de solos pobres em nutrientes. A alta concentração de fósforo e magnésio torna este biossólido excelente para melhorar solos que necessitam desses nutrientes, como solos com baixa fertilidade. Além disso, pode ser aplicado em grandes áreas agrícolas, especialmente em solos carentes de fósforo e cálcio.

Quadro 7 — Representação da análise dos pontos 1 e 2 coletados da ETE Turvínia, zona rural

Nutrientes	P1	P2	Potencial P1	Potencial P2
Matéria orgânica	483 g/kg	290,1 g/kg	Melhorar a qualidade do solo	Melhorar solos pobres, entretanto com complementação
Fósforo	354,2 mg/kg	351,6 mg/kg	Melhorar solos agrícolas que necessitam de fósforo, como solos com baixa fertilidade	Aumentar fertilidade de solos empobrecidos
Cálcio	469 mg/kg	96 mg/kg	Melhorar solos agrícolas que necessitam de cálcio, como solos com baixa fertilidade	Baixo teor, pode necessitar de complementação
Magnésio	26 mg/kg	20 mg/kg	Melhorar solos agrícolas que necessitam de magnésio, como solos com baixa fertilidade	Pode necessitar de adição complementar
pH	6,8	4,7	Ideal para muitas culturas	Solo muito ácido, pode precisar de correção

4.3.4. Estações de tratamento de esgoto na zona urbana

No quadro 8, examinou-se cada ETE como ponto de coleta de material. Após investigações, para cada ETE sugere-se indicação de uso.

Quadro 8 — Comparativo das análises das ETEs em zona urbana

Nutrientes	ETE Jardim Itália	ETE Pedro Paschoal	ETE São Carlos
Matéria orgânica	322,8 g/kg	352,5 g/kg	385,2 mg/kg
Efeito	Melhora a estrutura do solo e promove atividade biológica	Melhora a estrutura e fertilidade do solo	Indicado para solos agrícolas para aumentar a fertilidade
Fósforo	280,2 mg/kg	531,8 mg/kg	320,2 mg/kg
Efeito	Essencial para o crescimento das plantas	Indicado para solos pobres em fósforo	Aumenta a fertilidade de solos agrícolas
Cálcio	185 mg/kg	192 mg/kg	229 mg/kg
Efeito	Essencial para o crescimento das plantas	Contribui para melhorar a estrutura do solo	Melhora a estrutura e nutrição das plantas
Magnésio	30 mg/kg	20 mg/kg	44 mg/kg
Efeito	Importante para a fotossíntese e o metabolismo das plantas	Necessário para corrigir a deficiência nutricional em solos	Essencial para melhorar a estrutura e nutrição das plantas
pH	5,9	5,2	6,8
Efeito	Ligeiramente ácido, adequado para algumas culturas	Indicado para culturas que preferem solos ácidos	Ideal para a maioria das plantas

Na análise realizada, no quadro 8, ponto 1 da estação de tratamento de esgoto do Jardim Itália, constata-se que o bioSSólido gerado apresentou níveis satisfatórios dos nutrientes fósforo, 280,2 mg/kg, e cálcio, 185 mg/kg, ambos importantes para o crescimento das plantas. Enquanto a matéria orgânica (MO), com 323 g/kg, tem capacidade de melhorar a estrutura do solo e promover a atividade biológica. O pH de 5,9, apesar de ligeiramente ácido, ainda é adequado para a maioria das plantas.

Para o ponto 1, indica-se o bioSSólido coletado na utilização de melhoria de solos ácidos e arenosos, com o propósito de aumentar a matéria orgânica em solos arenosos, melhorando sua capacidade de retenção de água e nutrientes. Outra possibilidade de utilização, ainda no Quadro 8, ponto 1, é para cultivos de culturas com baixo pH, dado que o pH ácido pode ser benéfico para cultivos que preferem solo levemente ácido (Nascimento, 2019).

No Quadro 8, ponto 2, também se avalia a alta concentração de fósforo (531,8 mg/kg), tornando o bioSSólido um excelente recurso para solos com deficiência de fósforo. A matéria orgânica (352 g/kg) contribui para aprimorar a estrutura e a fertilidade do solo. Por sua vez, o

pH de 5,2 é mais ácido e, portanto, benéfico para a fertilização de áreas agrícolas com solo ácido, ou seja, culturas que necessitam de pH mais baixo.

Conforme observado no Quadro 8, ponto 3, o bioSSólido gerado possui boa concentração de fósforo (320,2 mg/kg), cálcio (229 mg/kg) e magnésio (44 mg/kg), além de 385 g/kg de matéria orgânica. Em relação ao pH de 6,8, encontra-se dentro da faixa ideal para a maioria das plantas.

Os materiais e nutrientes analisados revelam potencial para a aplicação e o aprimoramento geral do solo, devido à quantidade de nutrientes presentes nesse bioSSólido, podendo, assim, ser utilizado de maneira geral, em solos agrícolas para aumentar a fertilidade. Sugere-se a utilização desse bioSSólido no cultivo em solo com carência de cálcio e magnésio, com o intuito de melhorar a estrutura e a nutrição das plantas (Neves, 2017).

Os dados sugerem que as estações de tratamento de esgoto dos distritos de Botafogo e de Turvânia têm capacidade de melhorar solos com baixa fertilidade, em razão da alta concentração de fósforo, cálcio e magnésio. Os resultados da ETE urbana Pedro Paschoal possuem teores excelentes de fósforo, sendo ideais para solos que necessitam desse nutriente. A ETE Jardim Itália, por sua vez, pode contribuir para a melhora da estrutura de solos arenosos ou ácidos, com boas quantidades de matéria orgânica.

Os resultados da ETE São Carlos apresentam equilíbrio de nutrientes, o que a torna uma opção versátil para o aumento da fertilidade de solos agrícolas em geral. De forma conjunta, as análises manifestam que cada ETE tem características únicas que apontam o bioSSólido gerado como adequado para diferentes tipos de solos e necessidades agrícolas. Consequentemente, o aproveitamento desses bioSSólidos configura-se como uma solução eficaz para melhorar a fertilidade do solo de maneira sustentável.

4.3.5. Análise de granulometria e fertilidade do bioSSólido gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs)

A partir dos dados analisados, emergem algumas considerações pertinentes à fertilidade do solo promovida pelo bioSSólido gerado pelas estações de tratamento de esgoto dos perímetros urbanos e rurais. Para a avaliação física e química, é importante observar parâmetros como pH, a presença de nutrientes como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na), matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC), entre outros.

Em relação à análise do pH do biossólido, este varia entre 5,2 e 6,8 nas diferentes ETEs, indicando que os biossólidos são ligeiramente ácidos a neutros. Considerando que a faixa ideal de pH para a maioria das plantas situa-se entre 6 e 7, nota-se, portanto, que o pH das ETEs está dentro do intervalo adequado para utilização como fertilizante (Medeiros, 2007).

No que tange aos nutrientes essenciais, como o fósforo (P), os valores variam de 93 a 531,8 mg/kg, com o maior valor sendo registrado na estação de tratamento de esgoto Pedro Paschoal, zona urbana (531,8 mg/kg). O fósforo é essencial para o crescimento das raízes e para o desenvolvimento das plantas. Este valor é consideravelmente alto e pode indicar que o biossólido desta estação é rico em fósforo (Delarica, 2016).

Outro nutriente analisado foi o potássio (K), que apresenta boa variabilidade, com valores que oscilam de 0,1 a 4,5 cmol/dm³. Este nutriente é fundamental para a resistência das plantas a doenças e para o seu crescimento em geral. A presença de potássio em níveis adequados é vantajosa para o uso como fertilizante (Andrade, 2024).

Por sua vez, o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) são elementos fundamentais para a estrutura das plantas e para a saúde do solo. Os valores de cálcio e magnésio variam, sendo os mais elevados registrados na estação de tratamento de esgoto de Botafogo, zona rural (Ca: 434 mg/kg) e na estação de tratamento de esgoto São Carlos, zona urbana (Mg: 44 mg/kg). O cálcio e o magnésio presentes nos biossólidos são bons indicativos de que o solo pode ser adequado para a melhoria da fertilidade (Saraiva, 2017).

Verifica-se que a presença de sódio (Na) em níveis elevados (até 5,54 cmol/dm³) pode ser prejudicial, pois o excesso afeta a estrutura do solo e a absorção de nutrientes. Neste caso, os valores encontrados nas ETEs são baixos, exceto na estação de tratamento de esgoto São Carlos, zona urbana, que apresenta valor considerável (5,54 cmol/dm³).

A matéria orgânica (MO) e o carbono orgânico (CO) são essenciais para a melhoria das propriedades do solo, incluindo a retenção de água e a atividade biológica. Os valores da matéria orgânica variam entre 280,3 e 555 g/kg, indicando que, em algumas ETEs, a quantidade de MO é significativa e vantajosa para o solo (Nichele, 2009).

Com relação à capacidade de troca catiônica (CTC) e às saturações, estas variam entre 456,2 e 514,2 cmol/dm³, indicando boa capacidade de retenção de nutrientes. As porcentagens de saturação de base (SB) e as relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K também indicam que os solos podem ser equilibrados em termos de distribuição de nutrientes, dependendo da ETE.

Ao analisar os micronutrientes, tais como cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco

(Zn), que são importantes para o crescimento das plantas, observou-se variação entre as estações de tratamento de esgoto. De modo geral, os valores apresentaram-se dentro da faixa necessária para o crescimento adequado das plantas.

Com base nas proporções de areia, argila e silte, classificadas como composição granulométrica, esta é importante para determinar a textura do solo, que afeta a drenagem e a retenção de água. A quantidade de argila verificada variou, e o maior conteúdo desse componente foi encontrado na estação de tratamento de esgoto Botafogo – zona rural (2170 mg/kg). Esse fato representa maior capacidade de retenção de água, mas, por outro lado, pode resultar em solos mais compactados (Richart, 2005).

Os dados sugerem que os biossólidos das estações de tratamento de esgoto, devido à alta concentração de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e matéria orgânica (MO), possuem potencial para utilização como fertilizante de solos, especialmente nas estações com pH entre ácido e neutro, e com boa quantidade de micronutrientes.

No entanto, é primordial monitorar a concentração de sódio e ajustar as práticas de aplicação, a fim de evitar impactos negativos na estrutura do solo. Ademais, a textura do solo modificada pelos biossólidos pode contribuir para melhorar a retenção de água em solos mais arenosos. Contudo, deve-se considerar a aplicação com cautela, principalmente em solos que possuem baixa capacidade de retenção.

Em suma, as evidências sugerem que os biossólidos gerados nas estações de tratamento de esgoto, quando adequadamente tratados e aplicados, podem contribuir significativamente para o aumento da fertilidade do solo.

4.3.6. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10004, e as internacionais

Nos Quadros 9 e 10, exibe-se a análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras, CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10004, além das internacionais.

Quadro 9 — Resultados das análises do biossólido, segundo a ABNT NBR 10004

Parâmetros	Resultados				
	ETE Turvínia	ETE Mandembo	ETE Pedro Paschoal	ETE Botafogo	Unid. trab.
% de sólidos secos	50,6	84,8	93,2	74,5	%

Cianeto total	0,1	0,1	0,1	0,1	mg/kg
Óleos e graxas	77	25863	700,8	272,8	mg/kg
pH	7	7	5	5	
Ponto de fulgor	150	150	150	150	°C
Sulfeto de hidrogênio	1	1	1	1	mg/kg

Quadro 10 — Comparação dos resultados do bioassólido, segundo a ABNT NBR 10004

Resultados					
Parâmetros	ETE Turvínia	ETE Mandembo	ETE Pedro Paschoal	ETE Botafogo	Unid. trab.
% de sólidos secos	50,6	84,8	93,2	74,5	%
Cianeto total	<1,000000	<1,000000	<1,000000	<1,000000	mg/kg
Óleos e graxas	77	25863	700,8	272,8	mg/kg
pH	7	7	5	5	
Ponto de fulgor	>60,00	>60,00	>60,00	>60,00	°C
Sulfeto de hidrogênio	<10,000000	<10,000000	<10,000000	<10,000000	mg/kg

A fim de comparar os resultados apresentados com as principais legislações brasileira, europeia e estadunidense, foram considerados os parâmetros analisados e os limites estabelecidos para o uso e a disposição dos bioassólidos das estações de tratamento de esgoto (ETEs), especialmente no uso agrícola e na disposição final.

Essas legislações, em se tratando de Brasil, são a Resolução CONAMA n.º 375/2006, que regulamenta o uso do bioassólido em solos para fins agrícolas, e a ABNT NBR 10004/2004, responsável pela classificação dos resíduos sólidos considerando a periculosidade. Já a legislação europeia, a Diretiva 86/278/CEE, regula o uso do bioassólido em solos agrícolas, estabelecendo limites para metais pesados e contaminantes. Por fim, a legislação estadunidense, 40 CFR Parte 503 (EPA), normatiza o uso e a disposição dos bioassólidos de esgoto, com limites para patógenos, metais pesados e contaminantes orgânicos.

Conforme a Figura 26 a seguir, o parâmetro de sulfeto de hidrogênio, cujos valores observados (<10,000000 mg/kg) encontram-se abaixo do limite de detecção, demonstra segurança quanto à presença de compostos de enxofre tóxicos. Confrontando os resultados com as normativas, verificou-se que a legislação brasileira ABNT NBR 10004/2004 considera sulfetos para a classificação de resíduos perigosos, sendo seu limite de 100 mg/kg para resíduos da classe II. As normativas europeia e norte-americana não estabelecem limites específicos para

sulfeto de hidrogênio no biossólido.

Ao comparar, todos os valores (<10 mg/kg) estão abaixo dos limites para a classificação de resíduos perigosos no Brasil, como apresentado na Figura 26:

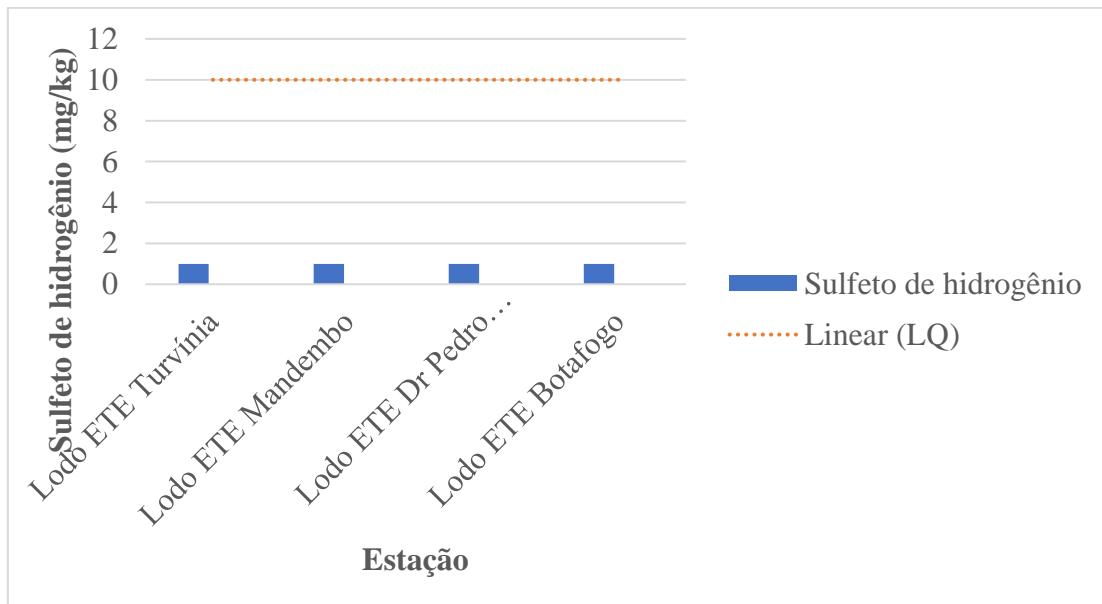


Figura 26 — Medição de sulfeto de hidrogênio no biossólido das ETEs

Na análise do ponto de fulgor (Figura 27), os valores extraídos foram todos acima de 60 °C, manifestando uma boa estabilidade em relação à inflamabilidade. Vale dizer que esse parâmetro não é usual nas legislações de biossólidos.

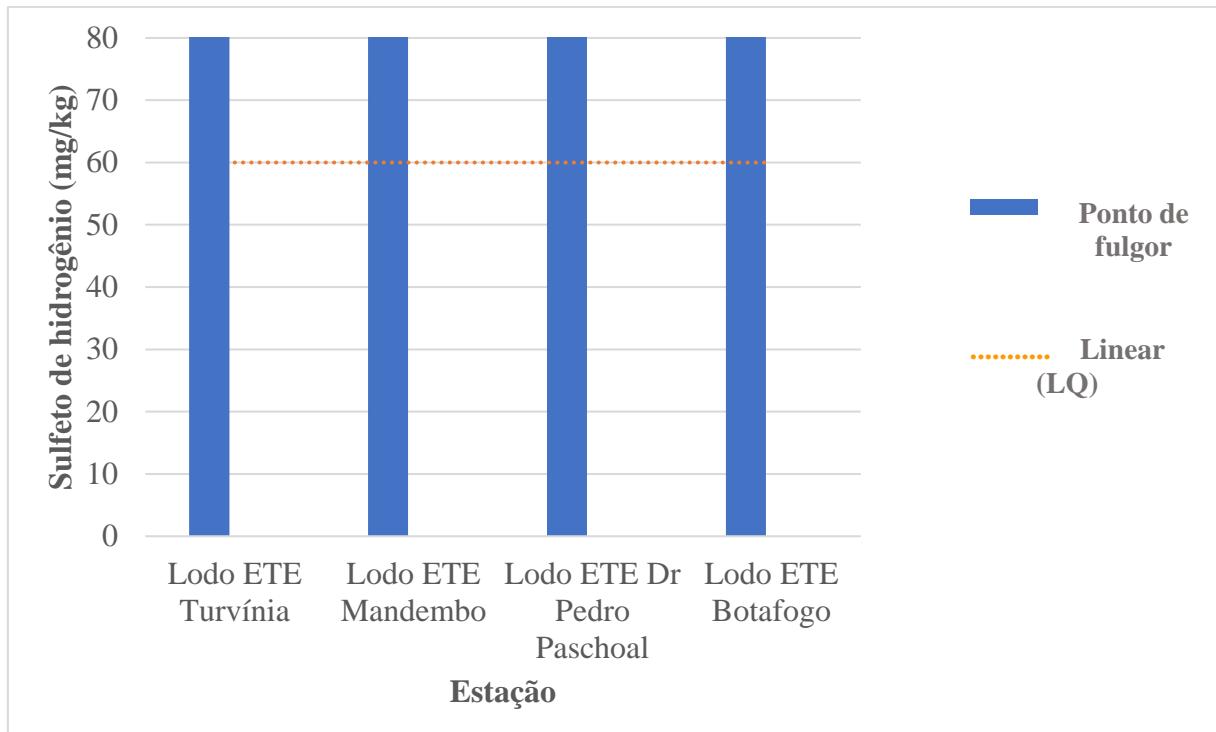


Figura 27 — Medição de sulfeto de hidrogênio e do ponto de fulgor no biossólido das ETEs

Em relação às análises, a ETE Pedro Paschoal apresenta a maior concentração de sólidos secos (93,2%), indicando, na Tabela 13, maior eficiência de desidratação. Considerando a estação de menor concentração, a ETE Turvínia apresenta (50,6%), o que pode sugerir menor eficiência na secagem ou características específicas do biossólido. A Figura 28 ressalta o cumprimento dos limites.

Tabela 13 — Comparação das análises percentuais de sólidos secos das ETEs relacionada com a legislação vigente.

ETE	VALORES OBSERVADOS	<u>NORMATIVA</u>		
		ABNT NBR 10004/2004	Diretiva 86/278/CEE	40 CFR Parte 503 (EPA)
Turvínia, zona rural	50,6%			
Botafogo, zona rural	74,5%	Para uso agrícola, recomenda-se teor de sólidos secos acima de 20% para facilitar o manuseio	Não especifica limites, mas altos teores (>50%) são desejáveis para o transporte e a disposição	Não especifica limites, mas altos teores (>50%) são desejáveis para o transporte e a disposição
Mandembo, zona urbana	84,8%			
Pedro Paschoal, zona urbana	93,2%			

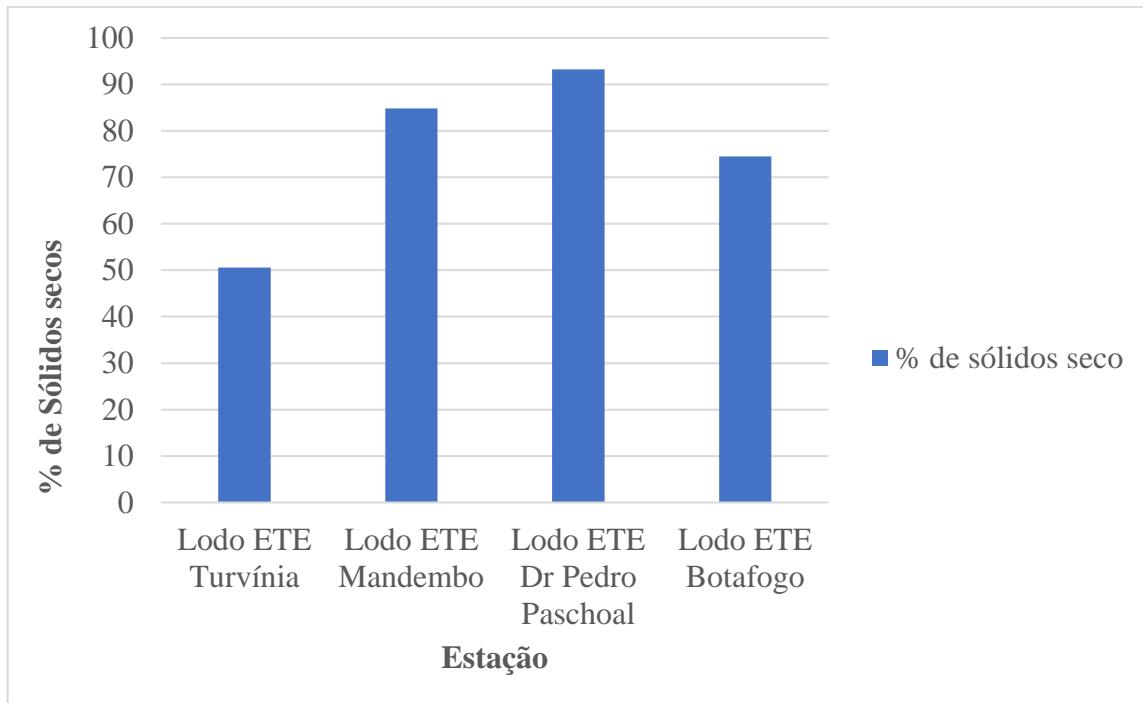


Figura 28 — Medição do parâmetro percentual de sólidos secos presentes no biossólido das ETEs

Todas as estações de tratamento de esgoto atendem ao mínimo operacional para manuseio e transporte, com destaque para as ETEs Mandembo e Pedro Paschoal (84,8% e 93,2%). Quanto à medição do cianeto total (Figura 29), os valores coletados foram de <1,000000 mg/kg. Os níveis estão abaixo do limite de detecção, sugerindo que o biossólido das quatro ETEs é seguro em relação à presença de cianeto.

De acordo com as legislações do Brasil (CONAMA n.º 375/2006), da Europa (86/278/CEE) e dos EUA (40 CFR Parte 503), não foram estabelecidos limites específicos para cianeto no lodo. Diante disso, todos os valores (<1 mg/kg) estão abaixo do limite de detecção, apontando ausência de restrições em qualquer das legislações apuradas.

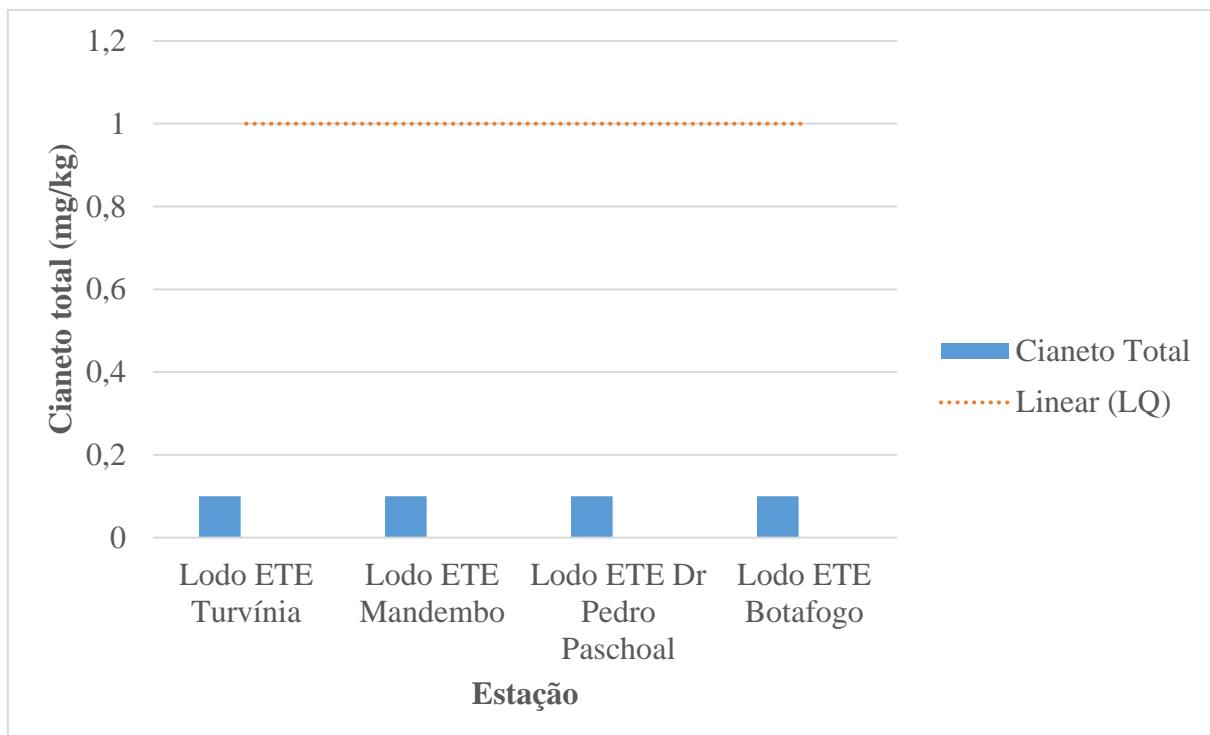


Figura 29 — Medição do parâmetro cianeto total presente no biossólido das ETEs

Na verificação dos parâmetros para óleos e graxas, observou-se que a ETE Mandembo exibe um valor elevado (25.863 mg/kg). Esse fato pode comprometer a disposição ou o uso do biossólido, enfatizando uma necessidade de investigar possíveis fontes de contaminação. Enquanto isso, a ETE Turvínia apresentou o menor valor (77 mg/kg), demonstrando menor presença de óleos e graxas. A seguir, a Tabela 14 reúne as análises comparativas entre as ETEs.

Tabela 14 — Comparação das análises de óleos e graxas das ETEs relacionada com a legislação vigente

ETE	NORMATIVA			
	VALORES OBSERVADOS	ABNT NBR 10004/2004	Diretiva 86/278/CEE	40 CFR Parte 503 (EPA)
Turvínia, zona rural	77 mg/kg		Não possui limites	Não possui limites
Botafogo, zona rural	272,8 mg/kg	Limite de até 100 mg/kg para resíduos	diretos para óleos e graxas, mas valores	diretos para óleos e graxas, mas valores
Mandembo,	25.863 mg/kg			

zona urbana Pedro Paschoal, zona urbana	700,8 mg/kg	da classe II (não perigosos)	elevados inviabilizar o uso agrícola devido ao impacto no solo	elevados inviabilizar o uso agrícola devido ao impacto no solo	podem devido ao impacto no solo
---	-------------	---------------------------------	---	---	---------------------------------------

Na análise comparativa executada, percebe-se que a medição da ETE Turvínia registrou 77 mg/kg, dentro do limite brasileiro. A ETE Mandembo marcou 25.863 mg/kg, excedendo em larga escala e revelando uma classificação como resíduo perigoso. A ETE Pedro Paschoal teve sua medição em 700,8 mg/kg, e Botafogo, 272,8 mg/kg, ambas excedendo os limites brasileiros para resíduos não perigosos, conforme apresentado na Figura 30:

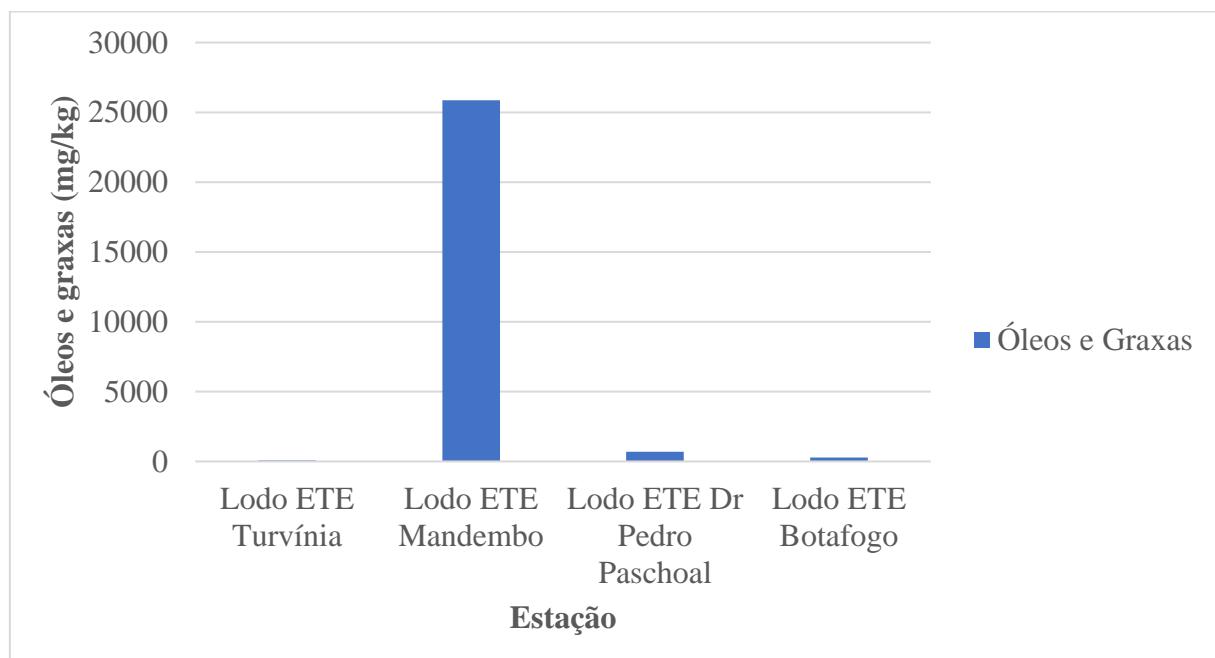


Figura 30 — Medição do parâmetro de óleos e graxas presentes no biossólido das ETEs

No estudo comparativo de pH, as medições foram as seguinte, inclusas na Tabela 15:

Tabela 15 — Comparação das análises do pH das ETEs relacionada com a legislação vigente

NORMATIVA

ETE	VALORES OBSERVADOS	ABNT NBR 10004/2004 E	Diretiva 86/278/CEE	40 CFR Parte 503 (EPA)
		CONAMA N. ^o 375/2006		

Turvínia, zona rural	7			
Botafogo, zona rural	5	Recomendado pH entre 5 e 8 para uso à neutralidade para diretamente, mas	Requer pH próximo à neutralidade para diretamente, mas	Não especifica pH
Mandembo, zona urbana	7	agrícola	biossólidos	considera o pH
Pedro Paschoal, zona urbana	5		aplicados ao solo	importante para a estabilização do lodo

O estudo apresenta que as ETEs Turvínia e Mandembo tiveram pH neutro (7) e estão no intervalo ideal para a aplicação agrícola, como atesta a Figura 31. Entretanto, as ETEs Pedro Paschoal e Botafogo possuem pH ácido (5), encontrando-se no limite inferior e, portanto, precisando de atenção em aplicações agrícolas sem tratamento prévio, especialmente em solos já ácidos, conforme Figura 31:

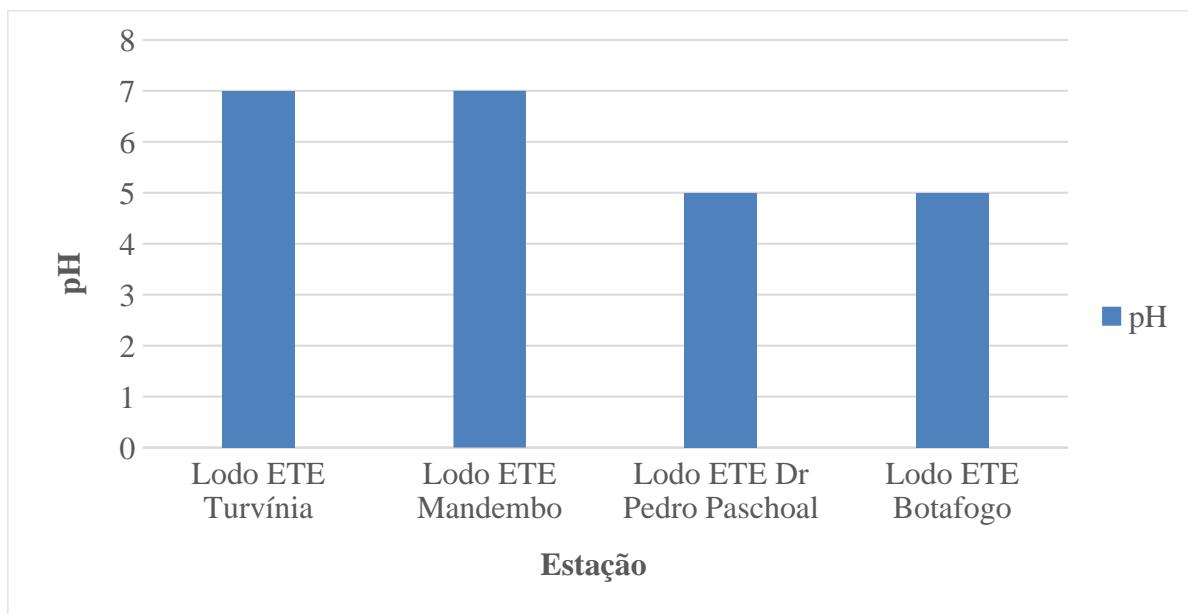


Figura 31 — Medição do parâmetro de pH no biossólido das ETEs

Considerando os valores extraídos no presente estudo, a ETE Mandembo possui elevado teor de óleos e graxas (25.863 mg/kg), fato que ressalta um problema na gestão do resíduo que limita a sua utilização no contexto agrícola. Há a probabilidade de a classificação desse biossólido ser resíduo perigoso, conforme legislação brasileira.

Por outro lado, as ETEs Pedro Paschoal e Botafogo apresentaram pH ácido (5), no limite

para o uso agrícola, exigindo cuidado ao aplicar em solos com pH semelhante. A ETE Pedro Paschoal manifestou melhor eficiência de desidratação, porém o pH ácido ainda é um desafio para algumas aplicações do bioassólido. Já a ETE Botafogo apresentou valores intermediários, sendo necessária atenção nesse caso específico.

Por outra perspectiva, a ETE Turvínia teve um bioassólido com pH neutro, baixa concentração de óleos e graxas, alta estabilidade, baixos níveis de contaminantes e menor teor de sólidos secos, originando um bioassólido mais indicado para o uso agrícola.

4.3.7. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10005, e as legislações internacionais

A normativa ABNT NBR 10005 aborda os processos de lixiviação de resíduos sólidos, sem especificação das origens dos elementos químicos presentes nos bioassólidos das estações de tratamento de esgotos (ETEs). Contudo, é viável identificar possíveis origens desses poluentes nos bioassólidos, com base na literatura técnica e nas propriedades comuns de águas residuais. Para análise, apresenta-se a medição nas Figuras 32 e 33:

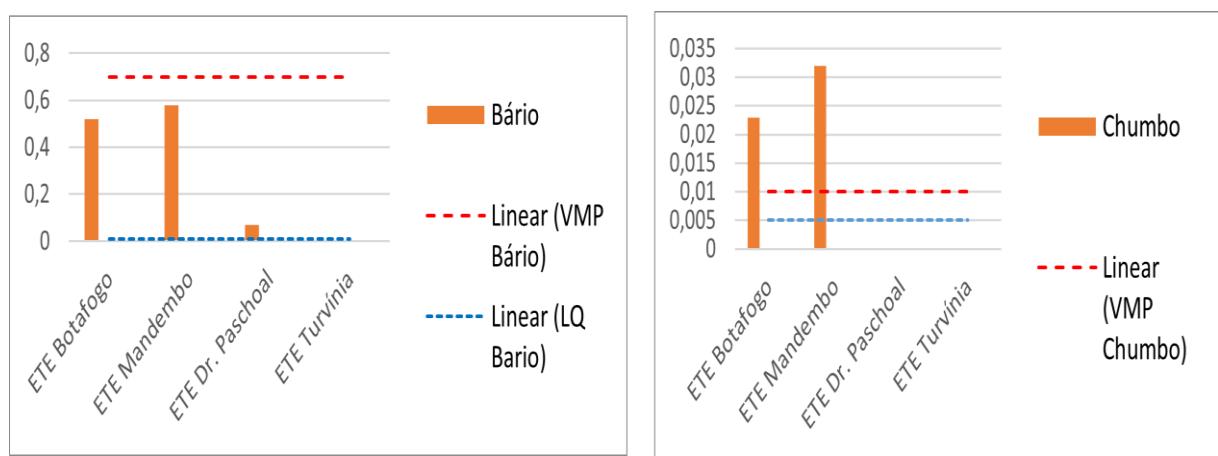


Figura 32—Demonstrativo dos elementos químicos bário e chumbo existentes nos bioassólidos das ETEs

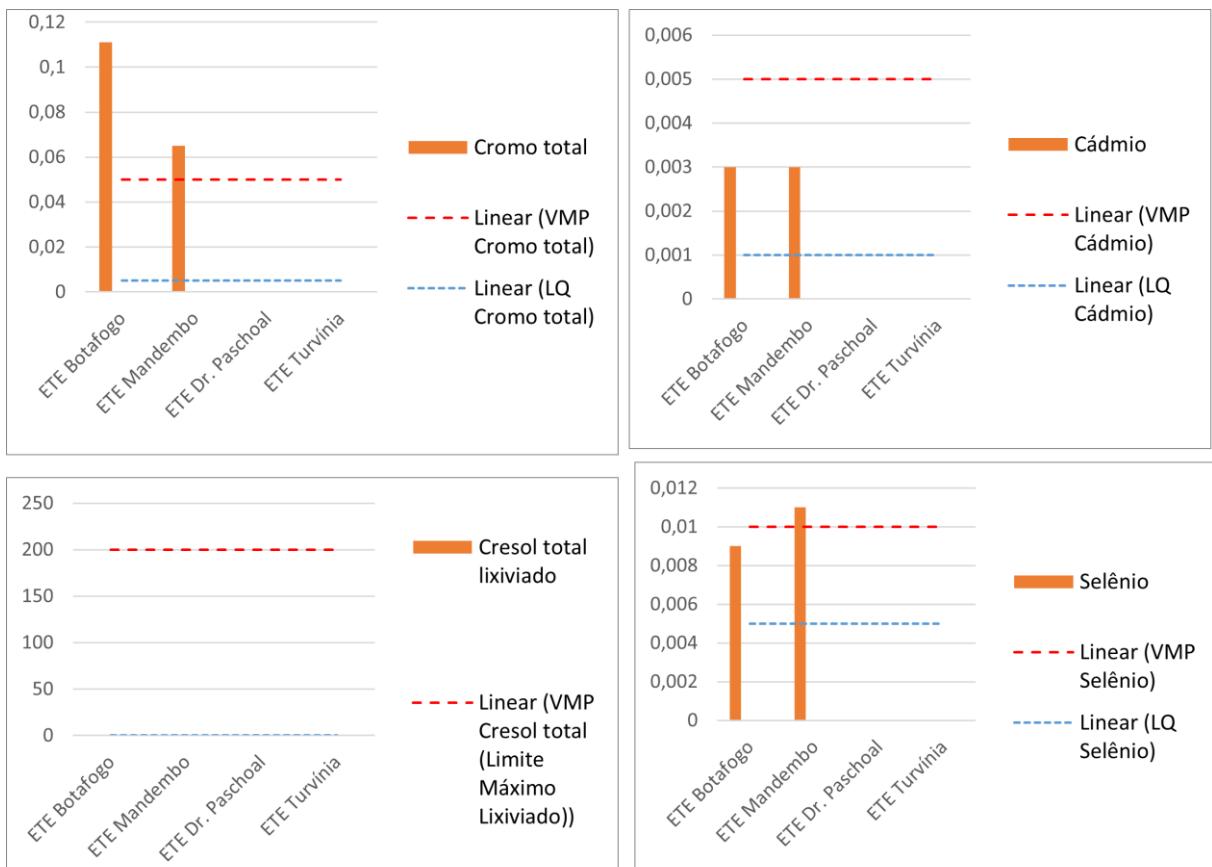


Figura 33 — Demonstrativo de elementos químicos, cromo total, cádmio, cresol total, selênio existentes nos biossólidos das ETEs. **Fonte:** elaborado pela autora.

A partir das medições acima, confrontam-se alguns autores que exploram os metais pesados em níveis variados, dependendo da localização da estação de tratamento. Ao se considerarem os estudos de Duan *et al.* (2017), há uma abordagem das concentrações de metais pesados em biossólidos de estações de tratamento de esgoto em Shanxi, China. Os autores identificam que metais pesados como Zn, Cr, Cu, Ni, Pb e Cd existem em níveis com variações ligadas à localização das estações de tratamento.

Esse estudo detalha contribuições significativas, evidenciando a correlação entre as origens da poluição e os níveis de metais pesados detectados. Um exemplo incluso pelo estudo refere-se à contaminação por cádmio, em que foram medidos altos valores na estação de tratamento de esgoto próxima a um parque industrial de eletrônicos. A pesquisa sugere que a indústria eletrônica é fonte relevante desse contaminante, o que reforça a ideia de que resíduos industriais, oriundos de distritos industriais, em particular onde há produção de baterias, podem ser potenciais fontes de cádmio, contaminante dos biossólidos das ETEs.

Além da contaminação por cádmio, a pesquisa destaca a contaminação por cromo. Os autores levantaram a possibilidade de estar relacionada à produção de cimento e à engenharia química, devido a uma estação possuir altos níveis desse metal. Esse fato corrobora que as atividades industriais locais impactam diretamente a qualidade dos bioassólidos.

Duan *et al.* (2017) mencionam que a presença de chumbo está associada ao tráfego. Diversas estações exibiram concentrações elevadas desse metal, indicando que fontes urbanas também desempenham papel relevante na contaminação. Os pesquisadores notaram, ainda, que os teores de metais pesados nas estações analisadas eram inferiores aos registrados em outras regiões da China. Tal constatação sugere que a gestão dos resíduos nessas regiões era mais eficaz nos efluentes, ou que havia uma menor carga industrial na área em comparação com outras localidades. No entanto, a persistência de metais pesados, mesmo em níveis mais baixos, ainda representa um risco ecológico a ser considerado, especialmente em uso do solo.

Os bioassólidos provenientes das estações de tratamento de esgoto (ETEs) podem acumular elementos químicos devido à entrada de esgotos industriais e domésticos. Por conseguinte, o monitoramento e o controle das fontes emissoras são essenciais para garantir a segurança na utilização e destinação desses materiais.

4.3.8. Análise comparativa dos metais pesados de acordo com as legislações brasileiras CONAMA n.º 375/2006 e ABNT NBR 10006, e as legislações internacionais

Segue o Quadro 11, comparativo da análise do bioassólido da ETE Turvínia, zona rural, com base nos valores máximos permitidos e limites de quantificação definidos pela ABNT NBR 10006.

Quadro 11 — Comparativo dos resultados com os valores permitidos pela normativa brasileira

ETE TURVÍNIA- ZONA RURAL				
Parâmetro	Resultado (mg L⁻¹)	Limite máximo permitido (mg L⁻¹)	Limite de quantificação (mg L⁻¹)	Situação
Cianeto total	0,005	0,07	0,05	Aprovado: Dentro do limite permitido e abaixo do limite de quantificação.

Fenol (colorimétrico)	0,07	0,01	0,001	Reprovado: Excede 7 vezes o limite permitido.
Surfactantes aniónicos	0,09	0,5	0,05	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Cloreto	19,155	250	0,5	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Sódio	24,496	200	0,2	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Nitrato	54,187	10	1	Reprovado: Excede em mais de 5 vezes o limite permitido.
Sulfato	504,585	250	0,5	Reprovado: Excede em mais de 2 vezes o limite permitido.

De acordo com as observações feitas entre os parâmetros reprovados, destaca-se o fenol pelo método colorimétrico ($0,07 \text{ mg L}^{-1}$), cuja concentração elevada indica possível poluição orgânica por compostos químicos. Em relação ao nitrato ($54,187 \text{ mg L}^{-1}$), foi apresentado um valor muito elevado, sugerindo possíveis fontes de contaminação agrícola ou industrial.

Com base nos resultados do sulfato ($504,585 \text{ mg L}^{-1}$), as concentrações acima do permitido sugerem que podem derivar de processos industriais ou fontes naturais. Os parâmetros aprovados, cianeto total, surfactantes aniónicos, cloreto e sódio, estão dentro dos limites permitidos e não apresentam risco imediato.

Recomenda-se desenvolver estratégias para melhorar o desempenho dos parâmetros reprovados. Para o fenol, sugere-se a implementação de tratamento de oxidação química ou processos avançados, como carvão ativado ou ozonização. Após a análise do nitrato, propõe-se a realização de avaliação da origem da contaminação (agricultura, esgoto doméstico ou industrial) e a adoção de técnicas de desnitrificação biológica.

Considerando o sulfato, torna-se uma demanda a utilização de processos de precipitação química, com bário, cálcio ou membranas de filtração avançadas. Outro fator relevante é a análise das fontes de contaminação, isto é, a investigação de possíveis fontes industriais ou agrícolas que possam ter contribuído para os elevados níveis de nitrato e sulfato.

Indica-se a realização de ajustes no tratamento, nos processos de remoção química ou biológica do sistema de tratamento da ETE, a fim de atender à normativa da ABNT NBR 10006. Além disso, recomenda-se a realização de monitoramento regular, implementando programa de monitoramento contínuo para garantir a conformidade com os limites estabelecidos. No Quadro

12, analisa-se o comparativo do biossólido da ETE Botafogo, zona rural, com base nos valores máximos permitidos e limites de quantificação definidos pela ABNT NBR 10006.

Quadro 12 — Comparativo dos resultados com os valores permitidos pela normativa brasileira

ETE BOTAFOGO, ZONA RURAL				
Parâmetro	Resultado (mg L⁻¹)	Limite máximo permitido (mg L⁻¹)	Limite de quantificação (mg L⁻¹)	Situação
Chumbo	0,007	0,01	0,005	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Cobre total	0,023	2	0,005	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Cromo total	0,04	0,05	0,005	Aprovado: Próximo do limite, mas ainda aceitável.
Fenol (colorimétrico)	0,092	0,01	0,001	Reprovado: Excede em mais de 9 vezes o limite permitido.
Bário	0,14	0,7	0,01	Aprovado: Bem abaixo do limite permitido.
Zinco	0,19	5	0,01	Aprovado: Dentro do limite.
Manganês	0,253	0,1	0,005	Reprovado: Excede em mais de 2 vezes o limite permitido.
Ferro	0,38	0,3	0,01	Reprovado: Acima do limite permitido.
Surfactantes aniônicos	0,4	0,5	0,05	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Alumínio	0,62	0,2	0,001	Reprovado: Excede em mais de 3 vezes o limite permitido.
Cloreto	17,988	250	0,5	Aprovado: Bem abaixo do limite permitido.
Sulfato	114,169	250	0,5	Aprovado: Dentro do limite estabelecido.
Nitrato	206,219	10	1	Reprovado: Excede em mais de 20 vezes o limite permitido.
Sódio	313,171	200	0,2	Reprovado: Acima do limite permitido.

Em consonância com os valores máximos permitidos e os limites de quantificação atualizados pela ABNT NBR 10006, procede-se à análise crítica do lodo da ETE Botafogo, localizada na zona rural. No que tange aos parâmetros em desconformidade, observa-se que o fenol (0,092 mg L⁻¹) excede significativamente o limite permitido. Essa ocorrência sugere que fontes industriais ou químicas estão contribuindo para a contaminação.

O valor do manganês (0,253 mg L⁻¹) supera em mais de duas vezes o valor permitido,

indicando possível origem geológica ou aporte externo. Parâmetros como o ferro ($0,38 \text{ mg L}^{-1}$) apresentam-se com valor de medição acima do limite, possivelmente em decorrência de processos de corrosão ou contaminação no sistema.

A concentração de alumínio ($0,62 \text{ mg L}^{-1}$) encontra-se três vezes acima do limite recomendado, sugerindo a necessidade de tratamento ou controle mais rigoroso. A análise do parâmetro nitrato ($206,219 \text{ mg L}^{-1}$), cujo valor é cerca de 20 vezes superior ao permitido, indica poluição significativa, provavelmente proveniente de efluentes agrícolas ou industriais.

O sódio ($313,171 \text{ mg L}^{-1}$) também foi medido acima do limite regulamentar, podendo gerar impactos adversos em corpos d'água e no solo. Metais como cobre, cromo, bário e zinco, embora estejam em baixas concentrações, apresentam-se em níveis seguros. Quanto aos parâmetros surfactantes aniónicos, cloreto e sulfato, todos os valores estão dentro dos limites estabelecidos, não oferecendo risco imediato.

Recomenda-se a realização de estudos para determinar as origens das contaminações e controlar as concentrações por meio de tratamento físico-químico. É essencial delinear estratégias para a redução dos níveis de fenol, nitrato e alumínio, identificando suas fontes e implementando tratamentos específicos. Para o fenol, aconselha-se a aplicação de técnicas de adsorção com carvão ativado; para o nitrato, processos de desnitrificação biológica ou oxidação química; para o alumínio, propõe-se a precipitação química ou a filtração adequada.

Ademais, é imprescindível estabelecer o monitoramento contínuo de ferro, manganês e alumínio, visando ao controle e à mitigação de riscos ambientais. Contudo, é importante readequar os processos da ETE, a fim de reduzir os níveis dos poluentes identificados como não conformes.

No quadro 13, efetua-se a análise crítica dos parâmetros do lodo da ETE Pedro Paschoal, com base nos limites máximos permitidos e nos limites de quantificação definidos pela ABNT NBR 10006.

As observações e conclusões feitas sobre os parâmetros reprovados, como o cádmio ($0,009 \text{ mg L}^{-1}$), realçam que sua concentração está acima do limite permitido, expondo possível contaminação industrial. Além disso, o cromo total ($0,055 \text{ mg L}^{-1}$) ficou levemente acima do limite estabelecido, sugerindo necessidade de controle mais rigoroso. O chumbo ($0,099 \text{ mg L}^{-1}$), por sua vez, demonstrou concentração extremamente alta, quase 10 vezes a quantidade permitida.

Quadro 13 — Comparativo dos resultados com os valores permitidos pela normativa brasileira.

ETE PEDRO PASCHOAL, ZONA RURAL				
Parâmetro	Resultado (mg L ⁻¹)	Limite máximo permitido (mg L ⁻¹)	Limite de quantificação (mg L ⁻¹)	Situação
Selênio	0,005	0,01	0,005	Aprovado: No limite de quantificação, mas dentro do limite permitido.
Cádmio	0,009	0,005	0,001	Reprovado: Excede em quase 2 vezes o limite permitido.
Cromo total	0,055	0,05	0,005	Reprovado: Levemente acima do limite permitido.
Bário	0,08	0,7	0,01	Aprovado: Bem abaixo do limite permitido.
Cobre total	0,09	2	0,005	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Chumbo	0,099	0,01	0,005	Reprovado: Excede em quase 10 vezes o limite permitido.
Fenol (colorimétrico)	0,185	0,01	0,001	Reprovado: Excede em mais de 18 vezes o limite permitido.
Manganês	0,347	0,1	0,005	Reprovado: Excede em mais de 3 vezes o limite permitido.
Surfactantes aniônicos	0,39	0,5	0,05	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Zinco	0,63	5	0,01	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Alumínio	0,79	0,2	0,001	Reprovado: Excede em quase 4 vezes o limite permitido.
Ferro	3,54	0,3	0,01	Reprovado: Significativamente acima do limite permitido.
Cloreto	6,495	250	0,5	Aprovado: Bem abaixo do limite permitido.
Sulfato	16,455	250	0,5	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Sódio	242,482	200	0,2	Reprovado: Excede o limite permitido.

O valor do parâmetro de fenol (0,185 mg L⁻¹) estava muito elevado, sinalizando uma poluição por substâncias químicas orgânicas. O manganês (0,347 mg L⁻¹) teve uma medida mais de três vezes superior ao limite, exigindo monitoramento rigoroso. Para o alumínio (0,79 mg L⁻¹), exemplo de excesso significativo, processos voltados à remoção foram inadequados ou fatores externos ao processo. Quanto ao ferro (3,54 mg L⁻¹), considerado altamente elevado, há preocupação com os impactos ambientais. Ademais, o sódio (242,482 mg L⁻¹) demonstrou-

se acima do limite, havendo necessidade de controle.

Por outro lado, parâmetros como selênio, bário, cobre total, surfactantes aniónicos, zinco, cloreto e sulfato encontram-se dentro dos limites permitidos e não representam risco imediato. As análises dos metais pesados neste estudo foram importantes para compreender os prejuízos ambientais e à saúde pública associados ao descarte ou reaproveitamento desse material.

O estudo de Fei-Baffoe *et al.* (2021) destaca o registro de ferro e sódio em níveis elevados, acima dos limites recomendados, por isso sugerem a necessidade urgente de controlar e reduzir os níveis. Os autores (*ibid.*) recomendam a implementação de processos de adsorção ou precipitação química para metais pesados como chumbo e cádmio, além de ajustes em processos de redução química para o cromo total e a utilização de oxidação química ou filtração avançada para a remoção de fenol.

Corroborando com a recomendação dos autores Fei-Baffoe *et al.* (2021) e de acordo com Gupta *et al.* (2021), foi analisada a questão da contaminação de metais pesados. Esta pesquisa trouxe diversas abordagens para o tratamento de águas residuais. O artigo reforça a necessidade de estratégias de adsorção e precipitação química, alinhando-se às recomendações anteriores sobre a diminuição de chumbo e cádmio.

A revisão enfatiza a importância de investigar as fontes de contaminação, especialmente no caso do sódio, e propõe a adoção de sistemas de remoção por troca iônica, os quais podem ser relevantes para a eficácia do tratamento de biossólidos de esgoto. Esses estudos evidenciam a complexidade da gestão de biossólidos gerados a partir das estações de esgoto e a necessidade de enfoque multidisciplinar para abordar os desafios associados aos metais pesados, destacando a relevância de soluções tecnológicas e práticas sustentáveis na diminuição dos impactos ambientais.

Adicionalmente, foram identificadas possíveis origens geológicas ou industriais para os altos níveis de manganês e ferro, sugerindo o uso de coagulação e filtração para o alumínio, que aqui atuam como estratégias adicionais.

4.4. Conclusão

Conforme as pesquisas supracitadas, sugere-se a realização de análises para a diminuição dos parâmetros reprovados, como chumbo e cádmio. Propõe-se a implementação

de processos de adsorção ou precipitação química para reduzir as concentrações do cromo total, bem como ajustes nos processos de redução química para situar as concentrações abaixo do limite. Para o fenol, considera-se a possibilidade de utilização de oxidação química ou processos de filtração avançados, como o carvão ativado.

Quanto ao manganês e ao ferro, recomenda-se a avaliação da origem geológica ou industrial e a implementação de precipitação química. Adicionalmente, devem-se aplicar técnicas de coagulação e filtração mais eficientes para o alumínio e, por fim, investigar as fontes de contaminação por sódio, adotando-se sistemas de remoção por troca iônica.

Ademais, é necessário estabelecer um programa contínuo de verificação da conformidade dos parâmetros e evitar excedências futuras, de acordo com a normatização da ABNT NBR 10006. No Quadro 14, foram analisados os metais pesados dos biossólidos da ETE Mandembo, com base nos valores máximos permitidos e nos limites de quantificação definidos pela ABNT NBR 10006.

A verificação dos parâmetros insatisfatórios sinaliza que o cromo total ($0,07 \text{ mg L}^{-1}$) ultrapassa o limite permitido. Isso pode estar ligado à contaminação por meio industrial ou ao uso impróprio de materiais que contêm cromo. Por sua vez, o fenol ($0,162 \text{ mg L}^{-1}$) é outro parâmetro que expôs valor bastante elevado, sinalizando contaminação química significativa.

A concentração de manganês ($0,242 \text{ mg L}^{-1}$) manifesta a existência de resíduos de origem mineral ou industrial. O alumínio ($0,94 \text{ mg L}^{-1}$) apresenta-se em alta concentração, possivelmente resultante de processos de coagulação ineficazes ou fontes externas, como desvelado nas análises de algumas ETEs.

O ferro ($2,76 \text{ mg L}^{-1}$) e o sódio ($614,832 \text{ mg L}^{-1}$) tiveram suas medições em níveis excessivos, ultrapassando os limites da legislação. Sugere-se que o ferro apresente contaminação por processos industriais ou naturais, enquanto o sódio pode ser proveniente de descargas de salmouras ou efluentes com elevada concentração de sais. De outro modo, os parâmetros aprovados nos limites permitidos — chumbo, selênio, cobre total, surfactantes aniônicos, bário, zinco, cloreto e sulfato — não apresentam riscos identificados.

Diante dos parâmetros em desconformidade, como o cromo total, empregar métodos de redução química ou remoção por adsorção é uma alternativa condizente. Em relação ao fenol, a sugestão é a adoção de técnicas avançadas de oxidação, como o carvão ativado. Para o manganês e ferro, recomendam-se processos de remoção via oxidação química e filtração.

Quadro 14 — Comparativo dos resultados com os valores permitidos pela normativa brasileira

ETE MANDEMBO, ZONA URBANA				
Parâmetro	Resultado (mg L⁻¹)	Limite máximo permitido (mg L⁻¹)	Limite de quantificação (mg L⁻¹)	Situação
Chumbo	0,007	0,01	0,005	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Selênio	0,01	0,01	0,005	Aprovado: No limite permitido.
Cobre total	0,057	2	0,005	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Cromo total	0,07	0,05	0,005	Reprovado: Excede o limite permitido em 40%.
Surfactantes aniónicos	0,08	0,5	0,05	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Fenol (colorimétrico)	0,162	0,01	0,001	Reprovado: Excede em mais de 16 vezes o limite permitido.
Bário	0,18	0,7	0,01	Aprovado: Dentro do limite permitido.
Manganês	0,242	0,1	0,005	Reprovado: Excede em mais de 2 vezes o limite permitido.
Zinco	0,3	5	0,01	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Alumínio	0,94	0,2	0,001	Reprovado: Excede em mais de 4 vezes o limite permitido.
Ferro	2,76	0,3	0,01	Reprovado: Excede em mais de 9 vezes o limite permitido.
Cloreto	34,144	250	0,5	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Sulfato	35,09	250	0,5	Aprovado: Muito abaixo do limite permitido.
Sódio	614,832	200	0,2	Reprovado: Excede em mais de 3 vezes o limite permitido.

No que diz respeito ao alumínio, propõe-se uma investigação sobre a origem do contaminante e o aprimoramento do tratamento de coagulação, no intuito de evitar níveis excessivos de alumínio residual. Para o sódio, aconselha-se a utilização de métodos de troca iônica ou osmose reversa para diminuir a concentração.

Além de controlar as fontes, é necessário identificar possíveis origens de contaminação externa, classificadas como industrial, agrícola ou natural, e minimizar a entrada de poluentes no sistema de tratamento. Para tanto, é importante o monitoramento contínuo para estabelecer um sistema constante capaz de identificar alterações nos parâmetros e executar possíveis

melhorias e ajustes no tratamento quando necessário. Assim, a conformidade com a ABNT NBR 10006 é viabilizada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2020 – Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ANDRADE, F. F. Divergência genética e seleção combinada para caracteres de sementes, agronômicos, tecnológicos e minerais em cultivares de feijão. 2024. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006.** Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 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 CONAMA. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 15 de maio de 2023b.

DELARICA, D. L. D. Carbono, nitrogênio e fósforo em latossolo após aplicação de lodo de esgoto por dezoito anos consecutivos. São Paulo: Editora Unesp, 2016.

DUAN, B. et al. Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 7, p. 823, 2017.

FEI-BAFFOE, B. et al. Levels of lead, copper, and zinc in cabbage (*Brassica oleracea sp.*) and lettuce (*Lactuca sativa sp.*) grown on soil amended with sewage sludge. **Journal of Environmental and Public Health**, v. 2021, n. 1, p. 7, 2021.

GUPTA, A. *et al.* A review of adsorbents for heavy metal decontamination: growing approach to wastewater treatment. **Materials (Basel)**, v. 14, n. 16, 20 ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/16/4702>. Acesso em: 16 maio 2024.

HOW TO LAB. **ISO/IEC 17025**: o que é, para quê e como implementá-la! 2023. Disponível em: <https://howtolab.com.br/blog/iso-iec-17025-conceitos-e-como-implementar>. Acesso em: 10 out. 2024.

ISO.ORG. **ISO/IEC 17025**: testing and calibration laboratories. [S. l.]: ISO, 2017. Disponível em: <https://www.iso.org/ISO-IEC-17025-testing-and-calibration-laboratories.html>. Acesso em: 10 out. 2024.

MEDEIROS, G. M. G. **Condições do reúso dos efluentes finais das ETEs do Estado da Paraíba**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal de Campina Grande/PB, Brasil, 2007. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3813>. Acesso em: 16 maio 2024.

NASCIMENTO, T. M. **Comprar bem me faz feliz?** A influência do comportamento pró-ambiental no bem-estar subjetivo do consumidor. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2019.

NEVES, T. I. **Aproveitamento energético do biossólido gerado por indústria têxtil como fertilizante para produção de capim-elefante — Cenchrus purpureus (Schumach.) Morrone**. 2017. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, Campus I, João Pessoa, UFPB, 2017.

NICHELE, J. **Utilização de efluentes sanitários tratados para o suprimento de nutrientes à cultura do milho e modificações em propriedades químicas do solo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina — Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 359-366, 2005.

SAMPAIO, A. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. **Revista DAE**, n. 193, set.-dez. 2013.

SARAIVA, S. A. M. **Recuperação de área degradada com o cultivo da palma forrageira (*Opuntia stricta* Haw) adubada com biossólido**. 2017. Dissertação (Mestrado em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, IFRN, Natal, 2017.

SILVA, J. P. G. **Análise da aplicação do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí (ETEJ) na produção de fertilizante orgânico**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Sorocaba, 2023.

UNIÃO EUROPEIA. Conselho das Comunidades Europeias. **Diretiva 91/271/CEE, de 21 de**

maio de 1991. Relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JOCE), L 135, p. 40-52, 30 maio 1991.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency. **40 CFR Part 503 – Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge.** Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1993. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-O/part-503>. Acesso em: 10 maio 2024.

CAPÍTULO 5 — CENÁRIO SOCIOAMBIENTAL E QUALIDADE DA ÁGUA DO CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

RESUMO

O acesso à água em quantidade e qualidade suficientes, em conformidade com o padrão de potabilidade estabelecido pela legislação vigente, constitui um direito humano fundamental. A ausência de universalização desse acesso, associada à carência de saneamento básico, acarreta impactos de naturezas social, ambiental e econômica. Recentemente, tem-se constatado um incremento nas queixas relacionadas à qualidade da água domiciliar, o que afeta a confiança dos consumidores e suscita preocupações no âmbito da saúde pública. Problemas como turvamento, presença de materiais sólidos, odores desagradáveis e sabor inadequado têm sido frequentemente reportados, indicando possíveis deficiências nos processos de tratamento ou na distribuição da água tratada. Esse cenário se agrava por interrupções no abastecimento e por condições climáticas adversas, como chuvas intensas, que contribuem para a deterioração da percepção comunitária acerca da qualidade da água fornecida. Este estudo tem como objetivo analisar e avaliar a qualidade da água tratada, bem como traçar o perfil socioeconômico e ambiental da população do município de Bebedouro/SP. A metodologia empregada consistiu na análise e avaliação físico-química e microbiológica da água proveniente do centro de distribuição municipal, incluindo as unidades CAPs I e II, poço profundo, poços artesianos e estações de tratamento de água (ETA), no período de maio a setembro de 2024. Adicionalmente, aplicou-se um questionário para investigar aspectos socioeconômicos e ambientais, a percepção sobre a qualidade da água, a ocorrência de doenças relacionadas ao consumo de água contaminada e as práticas de descarte de resíduos sólidos. Os dados coletados foram apresentados descritivamente por meio de tabelas, gráficos e figuras. Os principais resultados obtidos indicam: 1) não conformidade do parâmetro de turbidez nas CAPs I e II, além da influência de fatores ambientais na qualidade da água; 2) similaridades entre os parâmetros microbiológicos, de fluoretação e de turbidez ao se comparar a qualidade da água com os padrões de potabilidade e vigilância; 3) deficiências na relação com a comunidade no que tange a aspectos voltados à sustentabilidade e ao descarte de resíduos sólidos. Conclui-se que o monitoramento da qualidade da água no município cumpriu os parâmetros recomendados pela legislação referentes à água tratada. Entretanto, verificou-se que a comunidade carece de conhecimento sobre descarte de resíduos sólidos, resíduos especiais, centros de triagem de materiais e compostagem.

Palavras-chave: Abastecimento de água. Descarte de resíduos sólidos. Desenvolvimento socioeconômico e ambiental. Qualidade da água. Vigilância em saúde pública.

5.1. Introdução

A água potável é um direito humano essencial. Ela deve ser segura, livre de perigos de doenças associadas ao seu uso e em quantidade adequada para consumo, cozimento e higiene pessoal. Contudo, o acesso a ela e ao saneamento básico, em escala global, administrado de maneira segura, não é uma realidade universal.

A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (IBGE, 2018) revelou que 97,2% da população brasileira fazia uso de serviços de água potável administrados de maneira segura em 2017. Entretanto, esse percentual não condiz com a realidade enfrentada por diversos municípios brasileiros, principalmente os da Região Nordeste, devido à falta de fornecimento de água.

A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022) estima que 2,1 bilhões de pessoas, ou seja, uma em cada três pessoas no mundo, carecem de serviços de água potável, e esse número dobra para 4,2 bilhões sem tratamento de esgoto. Essa realidade se acentua nas comunidades em condições de vulnerabilidade social e rural.

Em decorrência desse fato, o consumo de água imprópria acarreta riscos à saúde pública, possibilitando diversas doenças, como hepatite E, hepatite A, rotavírus, enterovírus e norovírus, além de doenças bacterianas como as causadas por *Vibrio*, *Campylobacter*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Shigella*, entre outras.

Nesse contexto, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) propõe 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que visam, através da eliminação de todas as formas de pobreza, concretizar os Direitos Humanos em harmonia com as três dimensões do desenvolvimento sustentável: crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental. Diante do impacto social da falta de acesso à água potável, os objetivos deste estudo são analisar e avaliar a qualidade da água tratada, bem como traçar o perfil socioeconômico e ambiental da população do município de Bebedouro/SP.

5.2. Material e método

5.2.1. Análises física, química e microbiológica da água do centro de distribuição

Os dados foram obtidos por meio do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Bebedouro (SAAEB Ambiental) para a composição do objeto de pesquisa. A primeira etapa desse processo

foi a seleção das análises que contemplaram o estudo. Em seguida, esse material foi dividido por estes grupos de estudo: análise das CAPs I e II, das estações de tratamento de água (ETA) I e II, dos poços artesianos de abastecimento de todas as regiões urbanas, dos quatro distritos caracterizados como zona rural e do poço artesiano profundo do município de Bebedouro/SP.

Os dados foram comparados utilizando ferramentas de planilhas disponíveis no software Microsoft Excel 365®. A partir da comparação, todos os resultados em conformidade com a norma foram descartados, optando-se por desenvolver o estudo com os resultados em desconformidade. Para a análise do panorama das conformidades, foram averiguados 18 poços artesianos de diferentes localidades do município, incluindo quatro poços artesianos de diferentes distritos. Para a composição desta análise, foram realizadas coletas diárias e mensais da água bruta.

Efetuaram-se 93 análises entre os meses de maio, junho, julho e setembro de 2024, nos respectivos poços nos distritos de Turvária, Areias, Andes, Botafogo, Tropical, Pedro Paschoal, Souza Lima, São Carlos, Santo Antônio, Boa Vista, Santaella, Primavera, Júlia, Progresso, Poço Elizabeth, Europa, Centenário e, por fim, Poço 7 Jardim. Essas coletas foram cumpridas em períodos diferentes durante os meses das coletas.

Nesse contexto, foram analisados os parâmetros *Escherichia coli* e esporos aeróbios mesófilos. Para as verificações semestrais da água bruta dos poços, totalizaram-se 38 coletas, ocorridas nos períodos da manhã e da tarde, em cada poço, durante o mês de julho de 2024.

Foram analisados os parâmetros a seguir: aldicarbe, aldicarbe sulfona, aldicarbe sulfóxido, carbofurano, difenoconazol, cloreto de metileno (diclorometano), turbidez e cor verdadeira, fósforo, bário, cromo, níquel, cobre, urânio, selênio, arsênio, antimônio, chumbo, cádmio, mercúrio, tiram, nitrato, nitrito, fluoreto, hidroxiatrazina, paraquate, tiocarbe, glifosato, diuron, dioxano (1,4-dioxano), carbendazina, benzeno, 1,2-dicloroetano, etilbenzeno, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno, tolueno, xilenos, tricloroeteno, mancozebe + etilenotioureia (ETU), cloreto de vinila, acrilamida, epicloridrina, p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE, lindano (gama-HCH), clorpirifós + clorpirifós oxon, di (2-etilhexil) ftalato (DEHP), malation, metamidofós + acefato, metolacloro, molinato, pentaclorofenol, profenofós, simazina, tebuconazol, terbufós, trifluralina, propargito, dimetoato + ometoato, epoxiconazol, fipronil, flutriafol, metribuzin, picloram, protioconazol + protioconazol destio, tiameksam, pH, nitrogênio amoniacial, condutividade, *Escherichia coli*, ciproconazol, 2,4-D, ametrina, alacloro, atrazina + S-clorotriazinas, benzo(a)pireno, clordano (cis + trans), clorotalonil e aldrin +

dieldrin. Seguindo a mesma perspectiva, o estudo da água tratada semestralmente dos mesmos poços artesianos considerou os seguintes parâmetros: odor, gosto, cor aparente e turbidez, fósforo, bário, cromo, níquel, cobre, urânio, selênio, arsênio, antimônio, chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, zinco, ferro, sódio, pureza total, cálcio, magnésio, alumínio, monoclorobenzeno, sólidos dissolvidos totais, cloreto, nitrato, sulfato, aldicarbe, aldicarbe sulfona, aldicarbe sulfóxido, carbofurano, hidroxiatrazina, paraquate, tiocarbe, difenoconazol, glifosato, diuron, dioxano (1,4-dioxano), carbendazina, tiram, mancozebe + etilenotioureia (ETU), acrilamida, clorato, clorito, bromato, nitrito, 1,2-dicloroetano, 1,4-diclorobenzeno, 2,4,6-triclorofenol, 2,4-diclorofenol, N-nitrosodimetilamina, p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE, trihalometanos totais, lindano (gama-HCH), clorpirimifós + clorpirimifós oxon, di (2-etylhexil) ftalato (DEHP), malation, metamidofós + acefato, metolacloro, molinato, pentaclorofenol, profenofós, simazina, tebuconazol, terbufós, trifluralina, ácidos haloacéticos, propargito, epicloridrina, ciproconazol, cloreto de vinila, dimetoato + ometoato, epoxiconazol, fipronil, flutriafol, metribuzin, picloram, benzeno, cloreto de metileno (diclorometano), protioconazol + protioconazol destio, tiameksam, etilbenzeno, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno (tetracloroetileno), tolueno, xilenos, aldrin + dieldrin, sulfeto de hidrogênio, 2,4-D, alacloro, benzo(a)pireno, cloraminas totais, amônia (como N), cloro residual livre, coliformes totais (quantitativo) e *Escherichia coli*.

Outro estudo realizado mensalmente foi o da água bruta do poço profundo, coletada em horários alternados, entre os meses de maio, junho, julho e setembro de 2024, na unidade do Jardim Sanderson. A coleta semestral, no mês de julho de 2024, considerou os parâmetros a seguir: esporos aeróbios mesófilos, cor verdadeira e turbidez, fósforo, bário, cromo, níquel, cobre, urânio, selênio, arsênio, antimônio, chumbo, cádmio, mercúrio, aldicarbe, aldicarbe sulfona, aldicarbe sulfóxido, carbofurano, difenoconazol, hidroxiatrazina, paraquate, tiocarbe, glifosato, diuron, dioxano (1,4-dioxano), carbendazina, benzeno, 1,2-dicloroetano, etilbenzeno, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno (tetracloroetileno), tolueno, xilenos, p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE, lindano (gama-HCH), clorpirimifós + clorpirimifós oxon, di (2-etylhexil) ftalato (DEHP), malation, metamidofós + acefato, metolacloro, molinato, pentaclorofenol, profenofós, simazina, tebuconazol, terbufós, trifluralina, propargito, dimetoato + ometoato, epoxiconazol, fipronil, flutriafol, metribuzin, picloram, protioconazol + protioconazol destio, tiameksam, aldrin + dieldrin, sulfeto de hidrogênio, 2,4-D, alacloro, benzo(a)pireno, cloraminas totais, amônia (como N), cloro residual livre, coliformes totais

(quantitativo), *Escherichia coli*, pH, nitrogênio amoniacal, condutividade, cloreto de metileno (diclorometano) e etilbenzeno.

Em relação às análises semestrais da água tratada do poço profundo do Jardim Sanderson, elas foram realizadas no mês de julho de 2024, sendo analisados os parâmetros: odor, gosto, cor aparente e turbidez, fósforo, bário, cromo, níquel, cobre, urânio, selênio, arsênio, antimônio, chumbo, cádmio, mercúrio, manganês, zinco, ferro, sódio, pureza total, cálcio, magnésio, alumínio, monoclorobenzeno, sólidos dissolvidos totais, cloreto, nitrato, sulfato, aldicarbe, aldicarbe sulfona, aldicarbe sulfóxido, carbofurano, hidroxiatrazina, paraquate, tioclarbe, difenoconazol, glifosato, diuron, dioxano (1,4-dioxano), carbendazina, tiram, mancozebe + etilenotioureia (ETU), acrilamida, clorato, clorito, bromato, nitrito, 1,2-dicloroetano, 1,4-diclorobenzeno, 2,4,6-triclorofenol, 2,4-diclorofenol, N-nitrosodimetilamina, p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE, trihalometanos totais, lindano (gama-HCH), clorpirimifós + clorpirimifós oxon, di (2-etilhexil) ftalato (DEHP), malation, metamidofós + acefato, metolacloro, molinato, pentaclorofenol, profenofós, simazina, tebuconazol, terbufós, trifluralina, ácidos haloacéticos, propargito, epicloridrina, ciproconazol, cloreto de vinila, dimetoato + ometoato, epoxiconazol, fipronil, flutriafol, metribuzin, picloram, benzeno, cloreto de metileno (diclorometano), protioconazol + protioconazol destio, tiametoxam, etilbenzeno, tetracloreto de carbono, tetracloroeteno (tetracloroetileno), tolueno, xilenos, aldrin + dieldrin, sulfeto de hidrogênio, 2,4-D, aacloro, benzo(a)pireno, cloramidas totais, amônia (como N), cloro residual livre, coliformes totais (quantitativo) e *Escherichia coli*.

Para tanto, foram realizadas diversas coletas, sendo uma semestral da água tratada da ETA I, duas quinzenais da água bruta da ETA II, uma mensal da água bruta da ETA II e duas semestrais da água tratada da ETA II, totalizando seis análises.

Após a investigação de todos os materiais, poços artesianos, poço profundo, ETAs e CAPs, foram encontradas desconformidades apenas nas CAPs I e II. Foram 10 coletas das CAPs mensais, e duas semestrais nas CAPs I e II, durante o mês de julho de 2024, manifestando desvio somente nas coletas semestrais de ambas as CAPs, conforme os valores estabelecidos na Portaria GM/MS n.º 888, de 4 de maio de 2021; a turbidez apresentou-se acima do VMP de 5,0 uT.

5.2.2. Coleta de dados socioeconômicos e ambientais

Os dados socioeconômicos e ambientais foram obtidos por meio da aplicação de um questionário (Apêndice 1), direcionado à comunidade residente nas áreas de influência das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). A aplicação do instrumento ocorreu em 15 domicílios localizados nos territórios correspondentes às ETEs dos bairros Jardim Itália, Pedro Paschoal, Jardim São Carlos e Mandembo, situados na zona urbana, bem como nos bairros Botafogo e Turvânia, situados na zona rural, totalizando 90 intervenções.

Para a definição da amostra, foi delimitado um raio de 2 km ao redor de cada ETE, estabelecendo-se, assim, a área de abrangência do estudo. Dentro desse perímetro, foram selecionadas as 15 primeiras residências identificadas, cujos moradores estivessem presentes no momento da abordagem e concordassem em participar da pesquisa.

A mobilização teve como estratégia a busca ativa, priorizando localidades com maior número de transeuntes, como escolas, UBSs, praças urbanas e por meio de visitas domiciliares. O estudo proposto caracteriza-se como pesquisa básica, com base lógica operacional, método dedutivo e abordagem qualitativa. Nesse sentido, a pesquisa partiu da investigação geral das análises: perfil socioeconômico, qualidade da água, doenças ocasionadas pelo consumo de água contaminada e descarte de resíduos sólidos.

Para o cumprimento dos aspectos éticos da pesquisa, este estudo foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade do Estado de Minas Gerais, seguindo todos os requisitos legais estabelecidos na Resolução do Conselho Nacional de Saúde de n.º 466, de 12 de dezembro de 2012, que estabelece as normas e diretrizes reguladoras para pesquisas envolvendo seres humanos. O projeto foi aprovado no ano de 2024 sob o CAAE n.º 77943724.0.0000.0197 e parecer n.º 6.742.189. Para a digitação, tabulação dos dados da mobilização e geração dos gráficos, foi utilizado o Google Forms.

5.3. Resultado e discussão

O primeiro conjunto de análises aborda as estações de tratamento de esgoto e os respectivos bairros que contribuíram na aplicação do instrumental de análise socioeconômica e ambiental deste estudo (Figura 34).

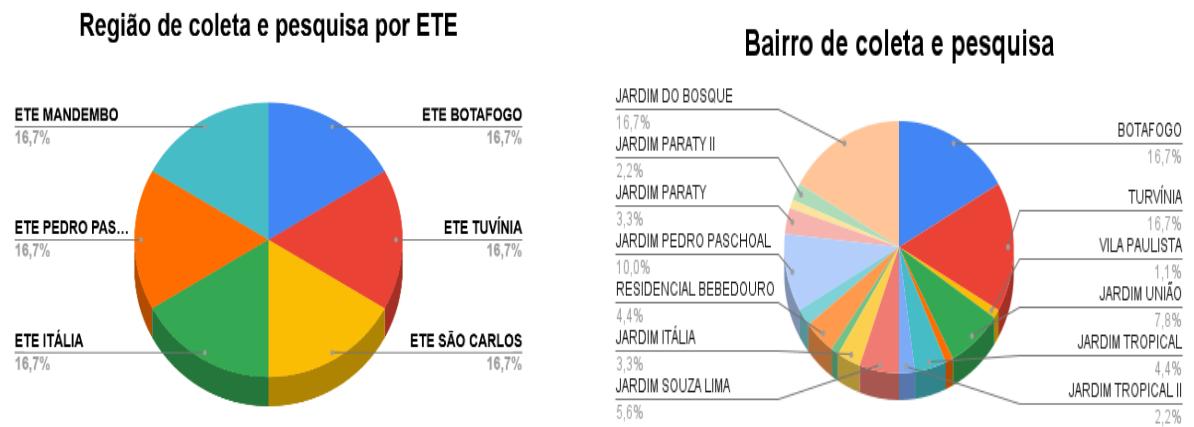


Figura 34 — Estações de tratamento de esgoto e respectivos bairros dos territórios. **Fonte:** elaborada pela autora

A Figura 35 exibe a visão geral das estações de tratamento de esgoto e dos respectivos bairros que contribuíram para a formação deste estudo. Na relação estação de tratamento/território do entorno, temos:

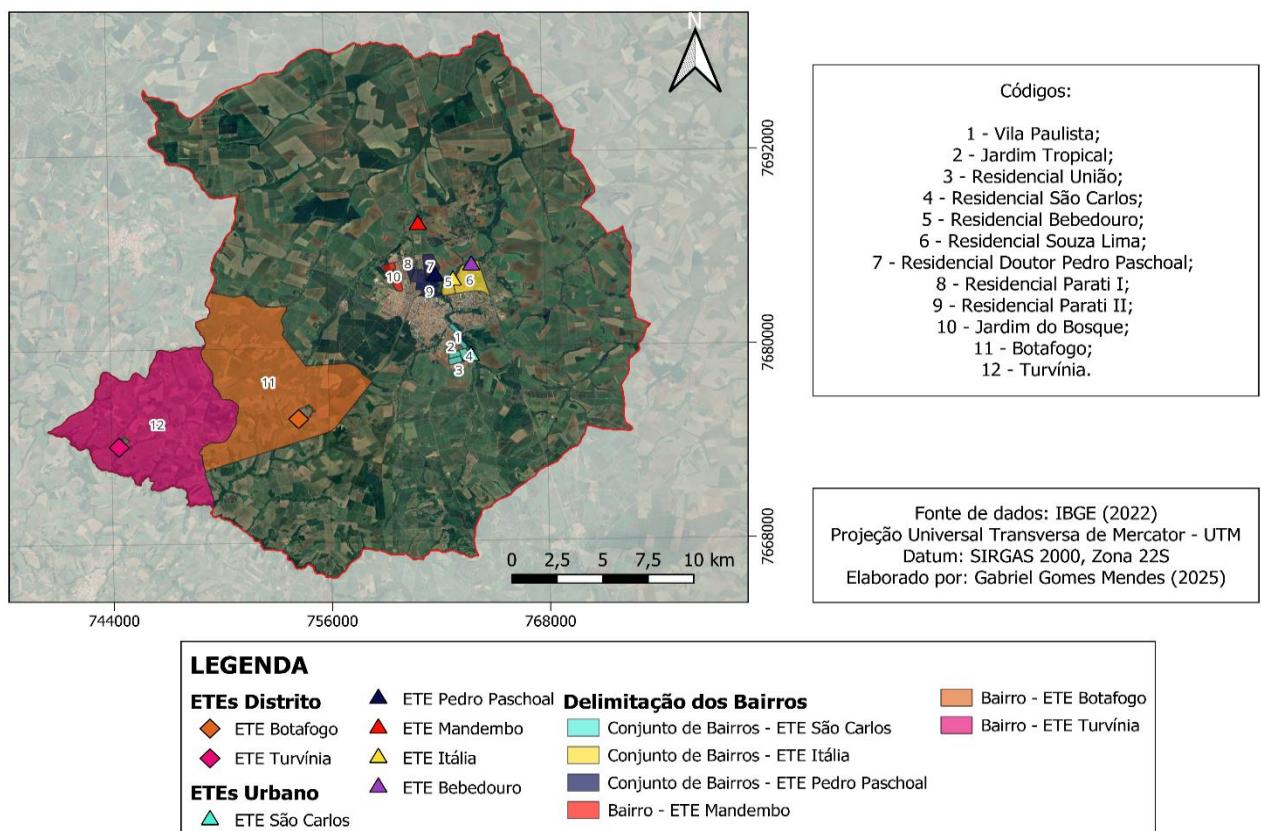


Figura 35 — Mapa de Bebedouro/SP, sinalizando a localização das estações de tratamento de esgoto do município e o território do entorno. **Fonte:** elaborada pela autora

Na composição dos resultados, verificou-se a participação de 10 bairros na zona urbana e 2 distritos na zona rural. As mobilizações nos territórios das estações de tratamento de esgoto Pedro Paschoal e Jardim Itália ocorreram nas Unidades Básicas de Saúde (UBSs) de cada unidade. Nos bairros dos territórios das ETEs Mandembo e São Carlos, zona urbana, as mobilizações ocorreram *in loco*, isto é, em domicílio. As intervenções realizadas nos distritos, zona rural, aconteceram nas UBSs, escolas locais, praças do entorno e por visitas domiciliares.

No total das abordagens, 33,4 % aconteceram na zona rural e 66,6% dos entrevistados encontravam-se na zona urbana. Estima-se que a população do município de Bebedouro/SP era de 76.373 habitantes em 2022, sua área territorial de 683.192 km² e densidade demográfica de 111,7 habitantes/ km² (IBGE, 2022), conforme a Figura 36 apresentada abaixo:

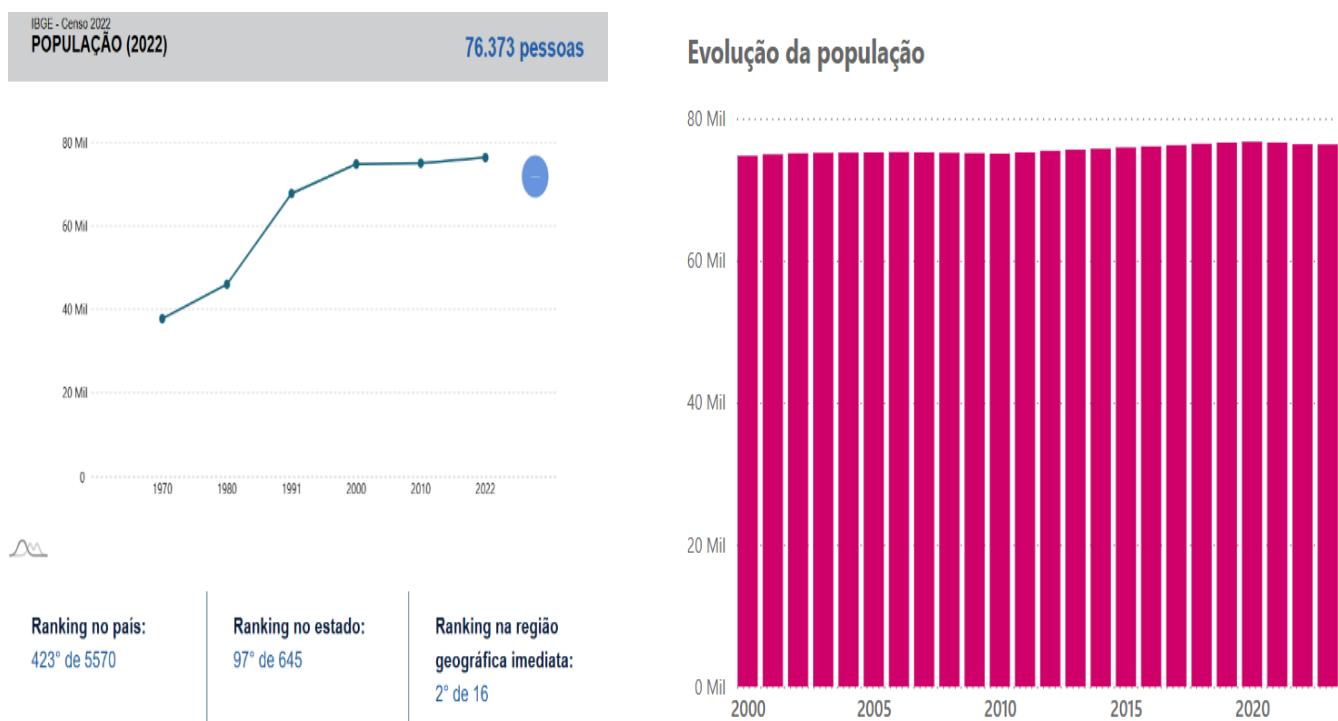


Figura 36 — Demonstrativo de evolução da população entre os anos 1970 e 2022, e 2000 e 2020. **Fontes:** IBGE (2022); SEADE (2023)

Percebe-se, no primeiro gráfico, que houve evolução significativa da população entre as décadas de 1970 e 2000. Após esse período, o processo de evolução do município manteve-se linear. Conforme exposto na Figura 37, o grupo de identificação de gênero feminino tem maior representação em termos percentuais (75,6%) na pesquisa da Fundação SEADE (2023).



Figura 37 — Identificação de gênero. **Fonte:** elaborada pela autora

Embora o maior percentual pertença ao grupo de gênero feminino, percebe-se na Figura 38 que, quando a análise é realizada por comparação de idade, o percentual maior atribui-se ao grupo de gênero masculino na faixa etária de 0 até 19 anos.

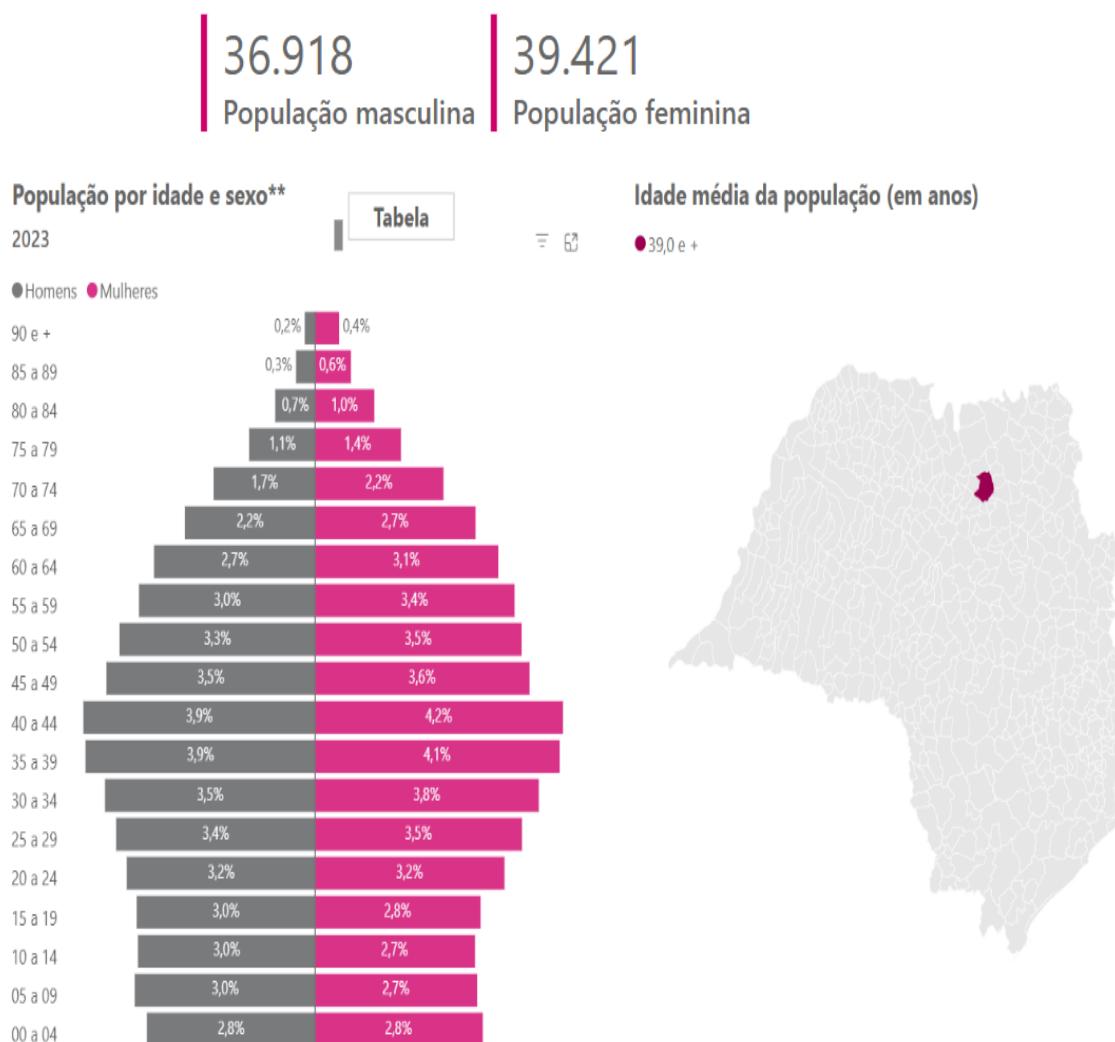


Figura 38 — Caracterização da população bebedourense por faixa etária e sexo em porcentagem. **Fonte:** Fundação SEADE (2023)

A seguir, apresenta-se essa caracterização por números reais na Tabela 16:

Tabela 16 — Caracterização da população bebedourense por faixa etária e sexo, em 2023

Ano de 2023			
Idade	Homens	Mulheres	Total
90+	126	304	430
85 a 89	240	456	696
80 a 84	509	757	1.266
75 a 79	843	1.100	1.943
70 a 74	1.303	1.650	2.953
65 a 69	1.674	2.063	3.737
60 a 64	2.071	2.357	4.428
55 a 59	2.265	2.567	4.832
50 a 54	2.517	2.659	5.176
45 a 49	2.685	2.761	5.176
40 a 44	2.984	3.192	6.176
35 a 39	2.955	3.148	6.103
30 a 34	2.705	2.880	5.585
25 a 29	2.561	2.663	5.224
20 a 24	2.423	2.437	4.860
15 a 19	2.296	2.129	4.425
10 a 14	2.279	2.056	4.335
05 a 09	2.319	2.086	4.405
00 a 04	2.163	2.156	4.319
Total	36.918	39.421	76.339

Fonte: Fundação SEADE (2023), adaptada pela autora.

Atestou-se na Figura 39, entre os anos 2000 e 2020, a redução significativa no percentual total da população na faixa etária entre 0 e 14 anos.

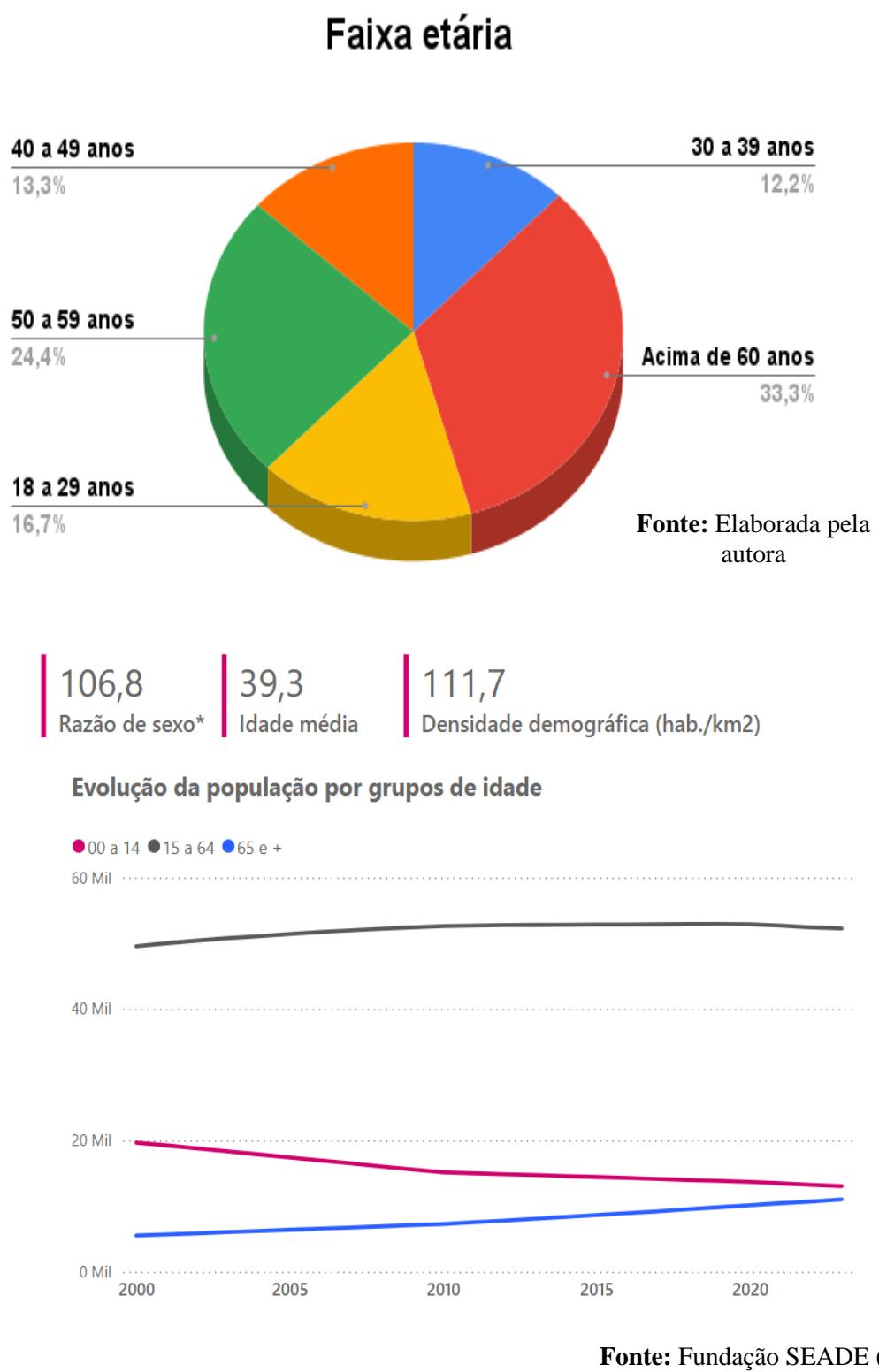


Figura 39 — Identificação da faixa etária participante da pesquisa e evolução da população por grupos de idade. **Fonte:** Fundação SEADE (2023) e elaborada pela autora.

Esse fenômeno possivelmente deve ter relação com o declínio das taxas de natalidade, como exibido no Quadro 15:

Quadro 15 — Número de nascimentos entre os anos 2010 e 2020 no município de Bebedouro.

Ano	N.º de nascimento	Ano	N.º de nascimento
2000	1.094	2011	911
2001	1.063	2012	926
2002	1.015	2013	837
2003	964	2014	928
2004	971	2015	948
2005	1.007	2016	912
2006	958	2017	1.012
2007	920	2018	930
2008	884	2019	918
2009	907	2020	914
2010	859		

Fonte: Ministério da Saúde (2020), adaptado pela autora, 2025.

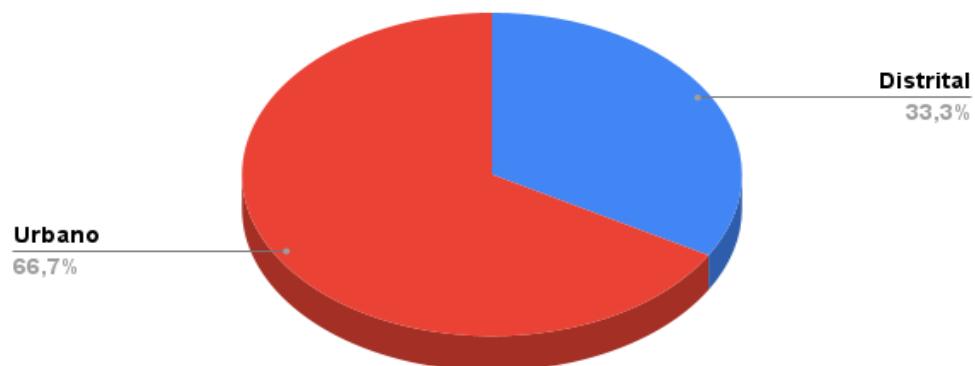
Por outro lado, a população bebedourense com idade entre 15 e 64 anos permaneceu com percentual estável ao longo de duas décadas, entre 2000 e 2020, mantendo-se como o maior grupo etário do município. No que diz respeito à população acima de 65 anos, observa-se uma tendência linear entre os anos de 2000 e 2010, com crescimento moderado após esse período.

De acordo com a pesquisa, a distribuição da população bebedourense revela características significativas em termos de cor ou raça. Segundo dados da Fundação SEADE (2023), a maioria da população é identificada como branca, totalizando 52.941 indivíduos, refletindo um percentual expressivo do total residente.

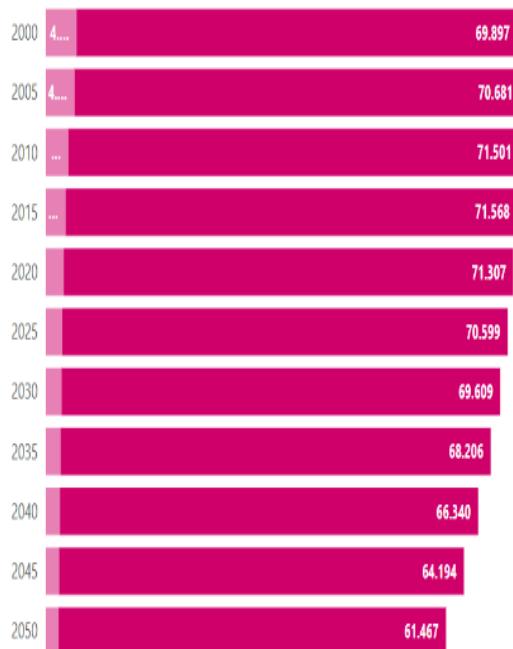
Em contrapartida, nota-se um contingente de 3.851 habitantes auto declarados como pretos, denotando um grupo menor em comparação aos demais. A população parda, auto declarada, constitui um grupo, com 17.899 pessoas, sendo o segundo maior grupo populacional do município.

A composição diversificada é fundamental no reconhecimento de dinâmicas sociais e econômicas que precisam ser abordadas para a garantia de um desenvolvimento equitativo e sustentável para todos os grupos.

Entre os anos 2000 e 2025, o município de Bebedouro passou por significativas mudanças demográficas, com o aumento da migração da população rural para áreas urbanas, observado na Figura 40.

Figura A**Zona urbana e zona rural****Figura B****Evolução da população urbana e rural**

(■) População rural (■) População urbana

**População urbana, rural e grau de urbanização**

2025

Município	Urbana	Rural	Total	Urbanização
Bebedouro	70.599	2.633	73.232	96,4%
Total	70.599	2.633	73.232	96,4%

Figura 40 — (A) Percentual de participantes e (B) evolução da população nas zonas urbana e rural. **Fonte:** (A) elaborada pela autora e (B) Fundação SEADE (2023)

Esse fenômeno foi possivelmente impulsionado por uma combinação de fatores econômicos, sociais e tecnológicos. O estudo sugere que, até 2050, as tendências demográficas terão um período transitório na composição das populações rural e urbana, indicando desaceleração na migração rural–urbana. A estrutura familiar nos domicílios estudados revela inclinação para arranjos familiares compactos, de acordo com a Figura 41.

Figura A
Estado civil

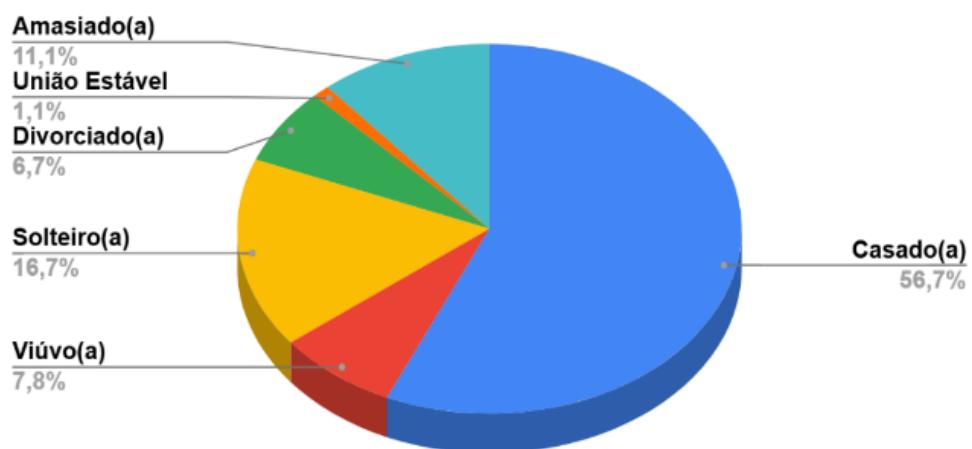


Figura B

Quantidade de crianças na residência

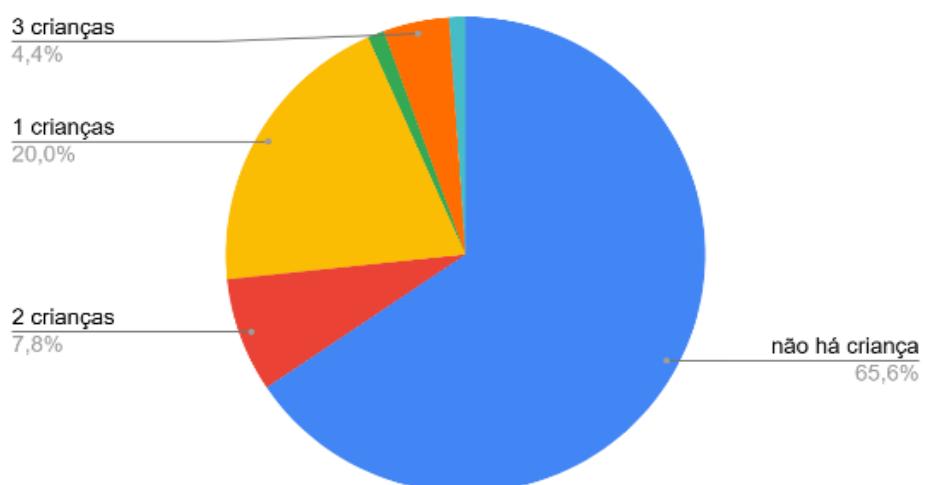


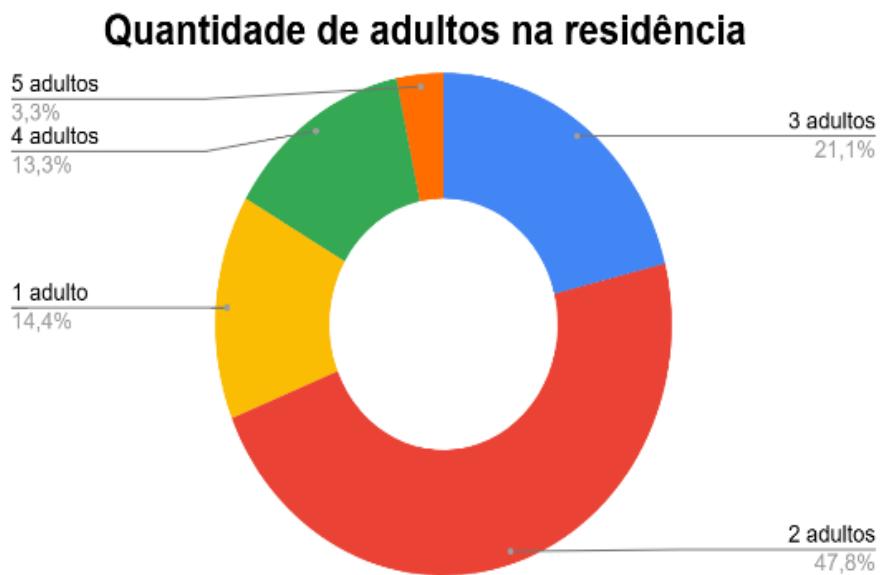
Figura C

Figura 41 — (A) Caracterização do estado civil, (B) quantidade de crianças na residência, (C) unidade familiar dos entrevistados. **Fonte:** elaborada pela autora

A unidade familiar de maior percentual é composta por até duas pessoas. Isso reflete mudanças nos paradigmas tradicionais de família, que, anteriormente, incluíam múltiplas gerações sob o mesmo teto. Atualmente, há prevalência de casais sem filhos ou com apenas um filho, resultado de fatores como planejamento familiar e maiores aspirações educacionais e profissionais (Coelho, 2019).

Neste estudo, o cenário de famílias compactas está localizado tanto na zona rural quanto na zona urbana, sustentando esses novos esquemas familiares nucleares. A variação no número de crianças nos domicílios tem-se tornado característica marcante dos núcleos familiares contemporâneos, refletindo as mudanças sociais e econômicas na atualidade.

Essa variação pode ser ocasionada, como apresentado no Quadro 15, pela diminuição da taxa de natalidade, resultando em famílias com menos filhos ou até mesmo sem crianças (Freitas, 2011). Fatores como maior acesso à educação, inserção feminina no mercado de trabalho e indivíduo arrimo do núcleo familiar contribuem para essa dinâmica, alterando a estrutura tradicional das famílias e impactando o planejamento demográfico para sustentar a nova configuração social (Mioto; Campos; Carloto, 2015).

Dados do IBGE (2022) indicaram que a média salarial mensal para trabalhadores formais no município de Bebedouro naquele ano alcançou a marca de 2,4 salários mínimos. Esse fato corrobora as informações reunidas na Figura 42, cuja análise demonstra que os maiores percentuais estão entre 1 e 2 salários mínimos.



Figura 42 — Caracterização da renda familiar. **Fonte:** elaborada pela autora

No entanto, 30,3% da população tem rendimento mensal per capita de $\frac{1}{2}$ salário mínimo, (SEADE, 2023). Para tal análise, consideram-se as diferenças regionais e setoriais que influem na composição dos rendimentos.

As unidades próprias em Bebedouro compõem a maioria expressiva das habitações, correspondendo a 83,3% do total de domicílios, segundo dados coletados na pesquisa. Tal prevalência, vista na Figura 43, reflete a preferência dos cidadãos por estabilidade e segurança em suas moradias.

Figura A

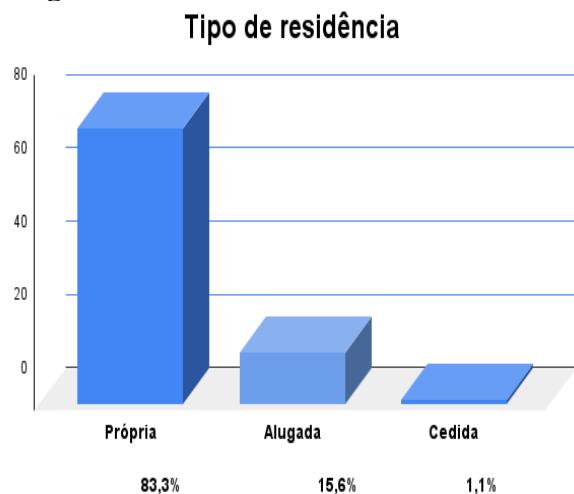


Figura B

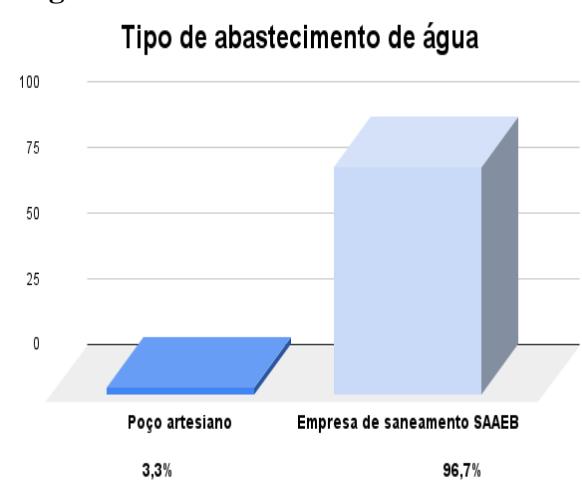


Figura 43 — (A) Caracterização do tipo do domicílio e (B) abastecimento de água. **Fonte:** elaborada pela autora

Em contrapartida, as unidades alugadas representam a 15,6% do total, evidenciando uma parcela substancial de moradores que não possuem residência permanente. Esse regime de habitação pode refletir a mobilidade populacional devido a fatores econômicos ou de trabalho. Ademais, a dinâmica das locações exige uma adaptação estratégica dos serviços municipais para assegurar que, independentemente do tipo de ocupação, todos os moradores tenham acesso adequado e eficiente à infraestrutura básica.

Constituindo apenas 1,1% dos domicílios, as unidades cedidas representam uma pequena fração do cenário habitacional; entretanto, são igualmente relevantes para a análise da distribuição de recursos hídricos. Essas unidades cedidas, muitas vezes oferecidas sem custo, podem apresentar desafios quanto ao abastecimento de serviços de água tratada, em função da informalidade dessas residências.

Esse fator destaca a importância de políticas inclusivas de infraestrutura, assegurando que até as habitações com arranjos menos formais sejam contempladas nos planos de abastecimento municipal, promovendo a coesão social e garantindo o direito universal aos serviços essenciais (Urnhani, 2023).

A distribuição de água tratada do município é coordenada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Bebedouro (SAAEB Ambiental), o qual certifica a entrega de água para a maioria dos habitantes do município. No total, 96,7% da população recebe água tratada pelo sistema de distribuição da autarquia. Esse percentual abrange a maioria dos domicílios, consistindo principalmente em unidades próprias e alugadas.

Denomina-se água tratada aquela que passou por processos de purificação para remover contaminantes físicos, químicos e biológicos, tornando-a segura para o consumo humano (Lira, 2014). Suas características incluem ausência de turbidez, cor, sabor e odor que possam indicar a presença de agentes prejudiciais (Richter, 2021). O processo geralmente inclui etapas como coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, assegurando que a água atenda aos parâmetros de qualidade estabelecidos por entidades regulatórias (Lopes *et al.*, 2024).

A água tratada deve, portanto, apresentar um pH equilibrado, baixos teores de cloro residual e estar livre de patógenos (Bortoli, 2016). Por outro lado, apenas 3,3% dos domicílios utilizam poços artesianos. Embora representada por uma pequena parcela da população, reflete alternativa relevante para a obtenção de água. Esta forma de captação d'água, apesar de menos comum, exige manejo cuidadoso tanto em relação à manutenção dos poços quanto à qualidade da água extraída, visando garantir atendimento aos critérios de potabilidade (Watanave, 2021).

Entretanto, durante a realização da mobilização, os(as) entrevistados(as) foram questionados sobre a periodicidade da manutenção e análise da água desses poços artesianos e 100% desses indivíduos relataram não realizar esse monitoramento. Contudo, a regulamentação e o monitoramento desses poços são importantes para evitar possíveis impactos ambientais, assegurando a sustentabilidade hídrica da região.

Em estudo junto com o SAAEB Ambiental, a cobertura de ligações de água atende a parcela significativa da população, conforme indicam os dados acerca do recebimento de água tratada e da posse de poços artesianos. Este sistema de ligações reflete no cotidiano dos cidadãos, proporcionando acesso regular à água tratada, fundamental para as necessidades básicas, promoção da saúde pública e o desenvolvimento sustentável do município.

O município contabiliza um total de 33.108 ligações de água, conforme os dados fornecidos pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Bebedouro (SAAEB Ambiental). A rede de ligações assegura que a maioria da população tenha acesso à água tratada, conforme apresentado na análise física, química e microbiológica apresentada anteriormente. Das 33.108 ligações, a maioria, com 32.438 ligações, está concentrada no próprio município de Bebedouro, demonstrando a alta densidade populacional e demanda nesta área.

Além disso, o distrito de Botafogo possui 390 ligações, o povoado de Areias conta com 16 ligações, o povoado de Andes tem 94, e o distrito de Turvânia destaca-se com 170 ligações. Com isso, foi analisada a frequência da interrupção de água do município, ilustrada na Figura 44:

Figura A

Interrupções no abastecimento de água

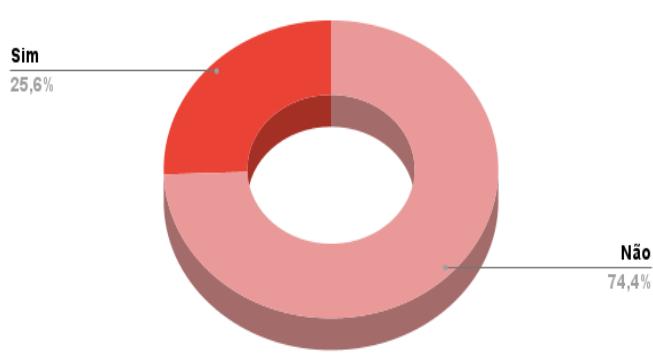


Figura B

Se a resposta anterior for sim, qual a periodicidade?

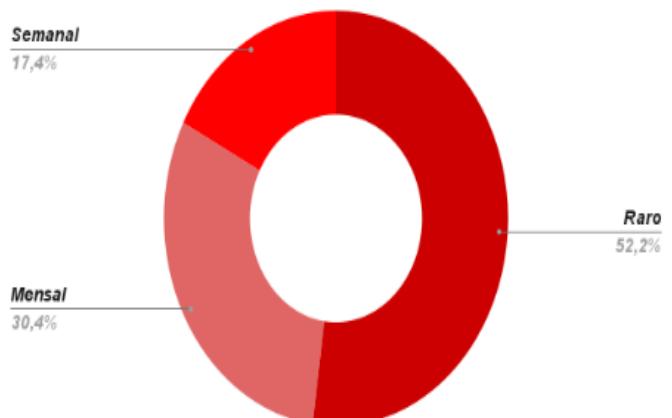
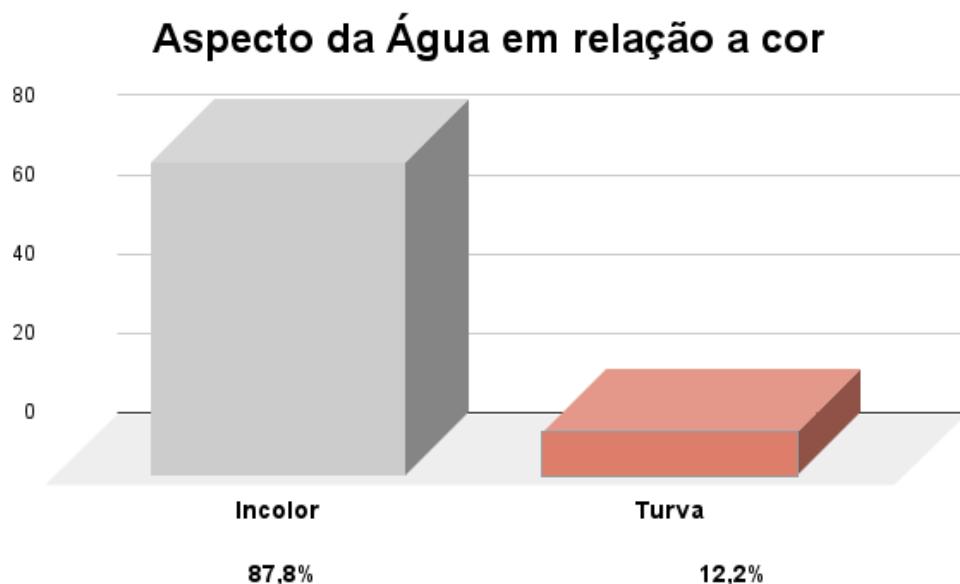


Figura C**Figura D**

Se turva ou amarelada, responda:

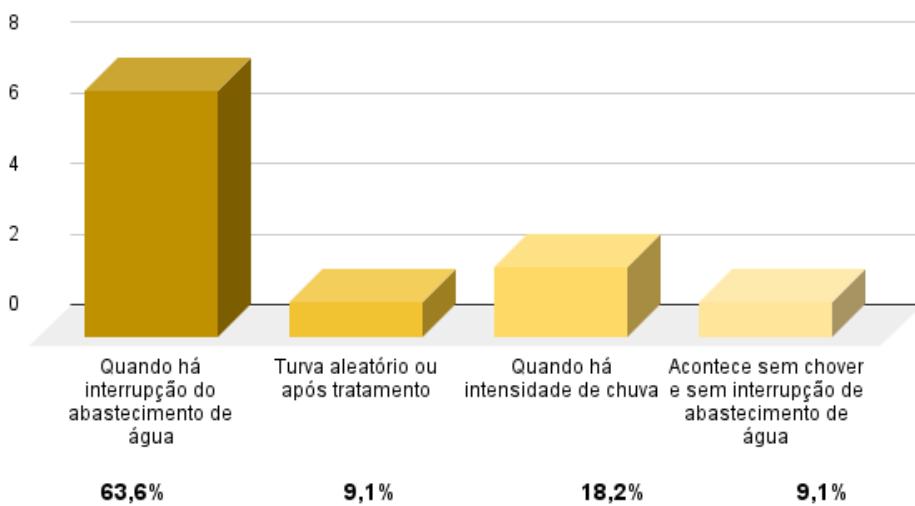


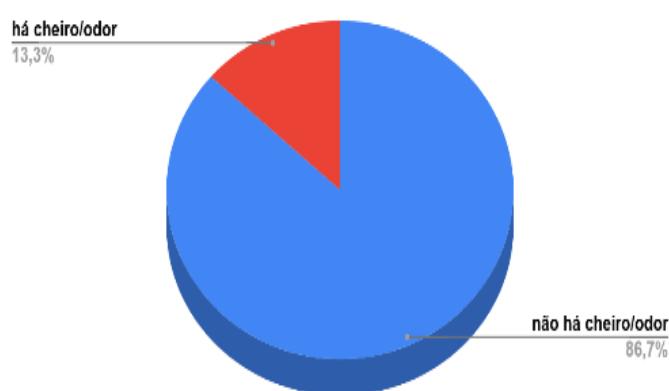
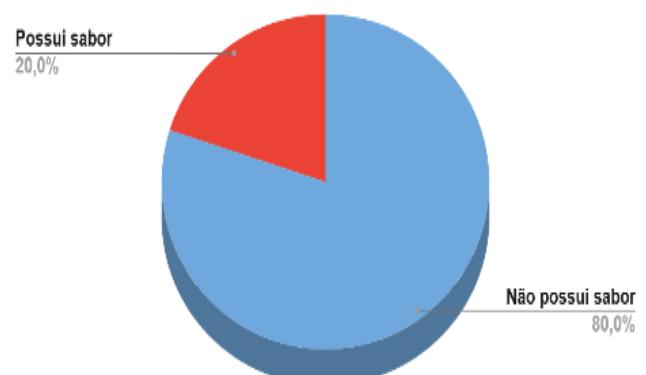
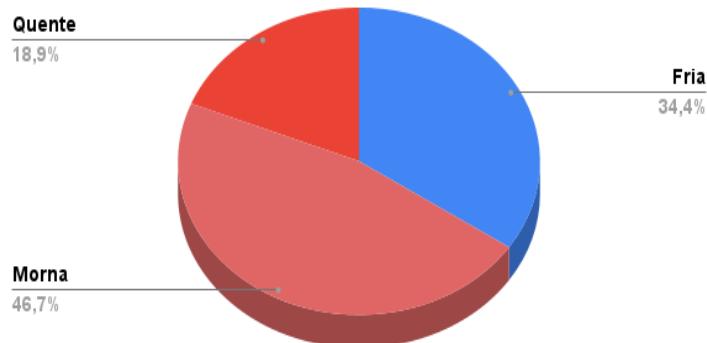
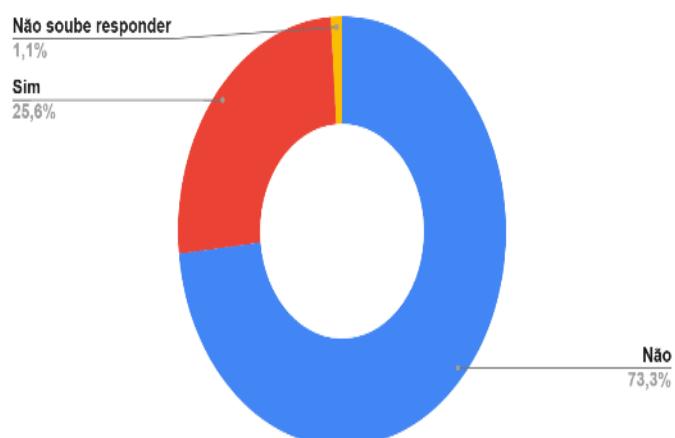
Figura E**Odor da água****Figura F****Sabor da água****Figura G****Temperatura da água da torneira****Figura H****Presença de materiais sólidos**

Figura I
Característica do sabor da água

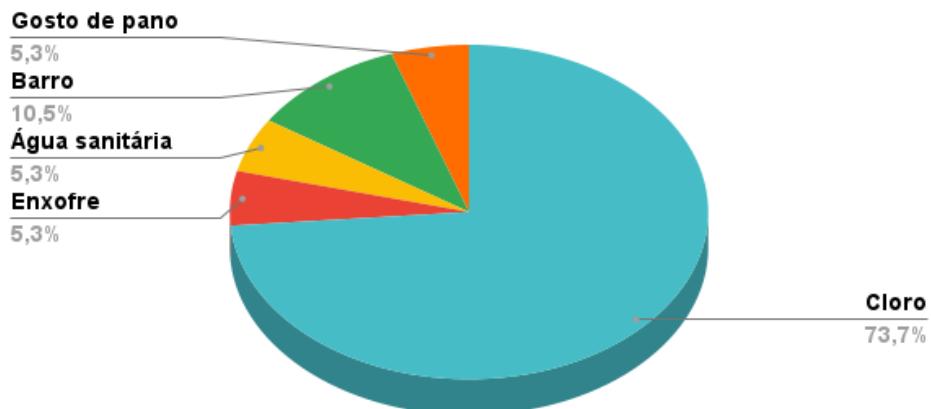


Figura J
Característica do odor da água

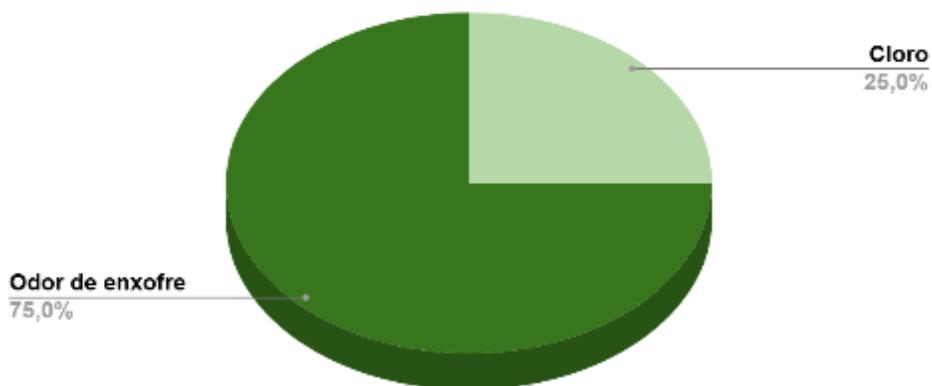


Figura 44 — (A) Interrupções no abastecimento de água, (B) periodicidade das interrupções do abastecimento, (C) aspecto da água em cor, (D) se turva ou amarelada, responda, (E) odor, (F) sabor, (G) temperatura da água, (H) presença de materiais sólidos, (I) característica do sabor da água, (J) característica do odor da água.
Fonte: elaborada pela autora

O estudo revelou que 12,2% dos(as) entrevistados(as) percebem turbidez na água tratada no ponto de distribuição. Dentre esse grupo, 63,6% notaram que essa condição ocorre principalmente após interrupções no abastecimento. Outros 18,2% associaram o problema a períodos de chuvas intensas, enquanto 9,1% mencionaram sua ocorrência sem relação aparente

com condições climáticas ou interrupções do serviço. Problemas esporádicos, reportados por outros 9,1%, sugerem falhas na infraestrutura de fornecimento ou tratamento da água, exigindo intervenções específicas.

Cerca de 25,6% dos(as) participantes do estudo indicaram a presença de materiais sólidos na água tratada, o que constitui uma preocupação em termos de qualidade e segurança do abastecimento. A ocorrência de partículas visíveis na água requer atenção redobrada dos órgãos responsáveis, pois pode indicar falhas nos processos de filtração e tratamento, bem como comprometer a confiança dos consumidores na qualidade do serviço oferecido (Mangelli, 2023). Esse problema demandará análises adicionais para identificar as fontes de contaminação e possíveis medidas de mitigação.

Quanto ao odor da água, este foi outro aspecto relatado por 13,3% dos(as) entrevistados(as), refletindo um incômodo notável entre a comunidade. Destes, 75% associaram o cheiro a enxofre, enquanto os outros 25% identificaram cheiro de cloro. A presença de tais odores pode ser um indício de reações químicas inadequadas durante o tratamento da água ou de possível contaminação em alguma fase do processo de distribuição (Oliveira, 2018).

A situação exige uma investigação minuciosa para determinar a origem desses odores e, consequentemente, orientar a adoção de estratégias que garantam a entrega de água sem características indesejadas. A percepção de gosto irregular na água foi reportada por 20% dos(as) participantes, com a maioria, 73,7% citando sabor de cloro, seguido por 10,5% que identificaram gosto de barro, 5,3% que mencionaram sabor de água sanitária, outros 5,3% sentiram gosto de enxofre, enquanto os demais relataram gosto de pano.

Essas revelações sugerem um potencial desajuste na dosagem de reagentes químicos ou mesmo contaminações específicas em pontos do sistema de distribuição (Lira, 2014). O enfrentamento desse problema requer investimentos rigorosos em sistemas de monitoramento e controle para assegurar a potabilidade e o bem-estar dos consumidores.

Os resultados obtidos neste estudo revelam uma série de desafios relacionados à qualidade da água nos domicílios, com percepções de turvamento, presença de materiais sólidos, odores e sabores indesejados. A turvação é particularmente prevalente durante interrupções de abastecimento, destacando-se como uma área crítica a ser abordada (Santos *et al.*, 2016). O odor de enxofre, mencionado por uma maioria significativa dos entrevistados, sugere a presença de sulfetos, possivelmente decorrentes da decomposição de matéria orgânica ou da atividade microbiana. Problemas de sabor, com destaque para o gosto de cloro, atrelam-

se a questões no processo de tratamento e distribuição da água (Ávila, 2018).

Aproximadamente 830 mil indivíduos perdem a vida anualmente devido a doenças diarreicas causadas pela escassez de água potável, ausência de saneamento e higienização das mãos inadequada (WHO, 2022).

O consumo de água tratada desempenha papel importante na promoção da saúde pública, prevenção de doenças e garantia da qualidade de vida. O tratamento da água (Figura 45) envolve processos físicos e químicos destinados a remover impurezas, incluindo microrganismos patogênicos, metais pesados e contaminantes químicos (Reali, 2019).

É importante o consumo de água tratada?



Figura A

Figura B



Figura C

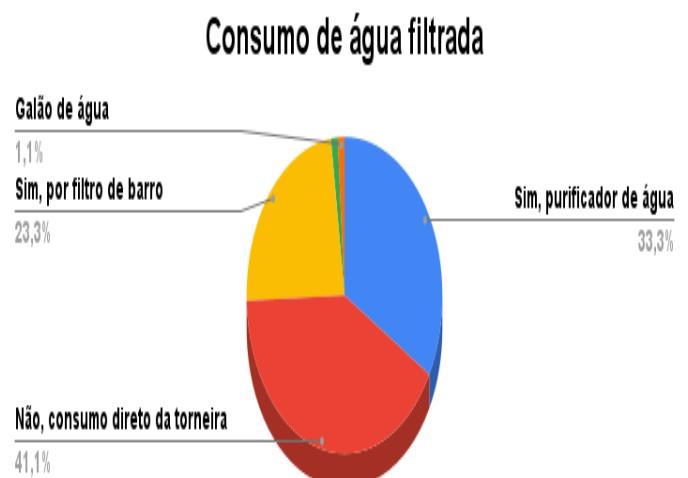


Figura 45 — (A) Importância do consumo de água tratada, (B) consumo de água filtrada, (C) periodicidade da troca dos filtros. **Fonte:** elaborada pela autora.

A conscientização sobre a importância do acesso à água tratada é fundamental para a implementação de políticas eficazes de saneamento e saúde pública. Observa-se um consenso entre os(as) entrevistados(as) quanto à importância da água tratada na prevenção de enfermidades e melhora da qualidade de vida.

O estudo realizado apresenta dados relevantes sobre o comportamento da comunidade em relação à água tratada. Dentre os(as) entrevistados(as), 100% afirmaram reconhecer a importância do consumo de água tratada e filtrada. No entanto, as práticas de consumo variam: 41,1% preferem água da torneira sem filtragem adicional, 33,3% utilizam purificadores de água e 23,3% confiam em filtros de barro tradicionais. Apenas 1,1% optam por adquirir água em galões, enquanto 1,2% consideraram irrelevante a questão apresentada. Esses números evidenciam a disparidade entre a percepção e a prática.

De acordo com os dados apresentados, a pesquisa fornece *insights* importantes sobre o consumo de água filtrada e lacunas entre teoria e prática. Com a totalidade dos(as) entrevistados(as) concordando sobre a importância da água tratada, espera-se uma adesão considerável a métodos seguros de consumo.

No entanto, a predominância de 41,1% que consome água da torneira sem filtragem e a significativa porção de 23,3% que opta por filtros de barro, método tradicional, sugerem a persistência de barreiras econômicas, culturais ou de informação que podem comprometer a eficácia do tratamento de água. Essas descobertas destacam a necessidade de campanhas educacionais e melhorias no acesso a tecnologias de tratamento eficazes (Oliveira, 2024).

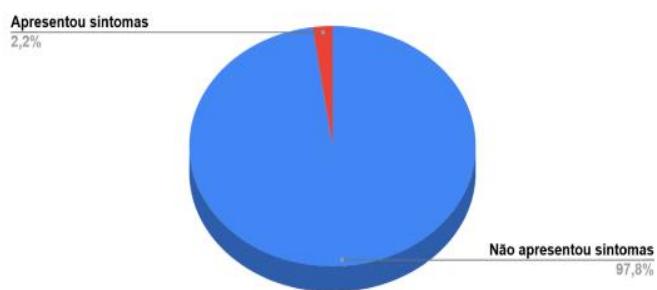
Aspectos econômicos exercem um papel preponderante na escolha do método de filtragem de água entre os consumidores, uma vez que nem todos os consumidores podem arcar com investimentos elevados (Barros, 2015). O custo inicial para a aquisição e a instalação de sistemas de purificação, como purificadores elétricos ou filtros de barro, possivelmente determina a escolha.

A manutenção e substituição de filtros também pesam na decisão. Devido a isso, a comunidade busca por soluções eficazes e acessíveis financeiramente. A relação custo-benefício, que equilibra os gastos com os benefícios percebidos, é um critério central na tomada de decisão, especialmente entre indivíduos com renda média limitada.

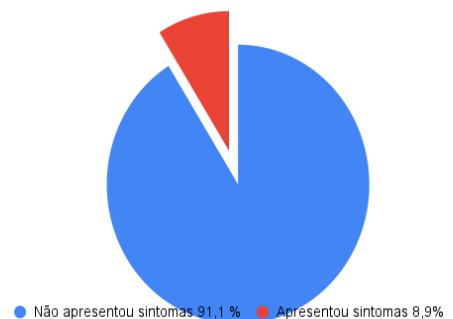
O consumo de água tratada contribui com benefícios significativos à saúde, como prevenção do risco de contrair doenças transmitidas por consumo de água contaminada (Figura 46), como cólera, disenteria, febre tifoide, entre outras. Além disso, é essencial para a saúde

dos grupos populacionais vulneráveis, crianças e idosos, suscetíveis a infecções. Contudo, o acesso à água tratada desempenha papel fundamental nas práticas de higiene pessoal e segurança alimentar, promovendo um ambiente mais saudável.

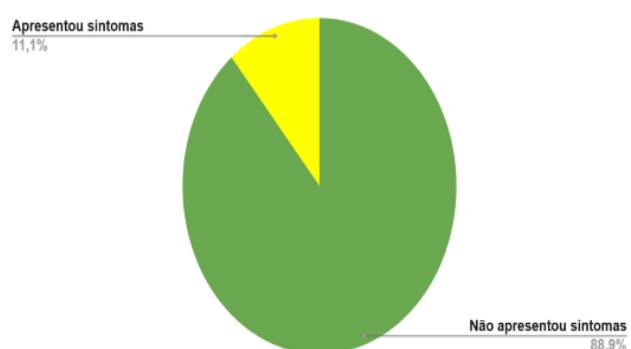
Sintomas de amebíase – Figura A



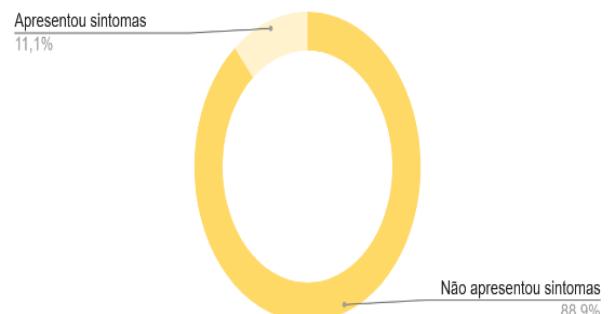
Sintomas de ascaridíase – Figura B



Sintomas de giardíase – Figura C



Sintomas de hepatite – Figura D



Sintomas de leptospirose – Figura E

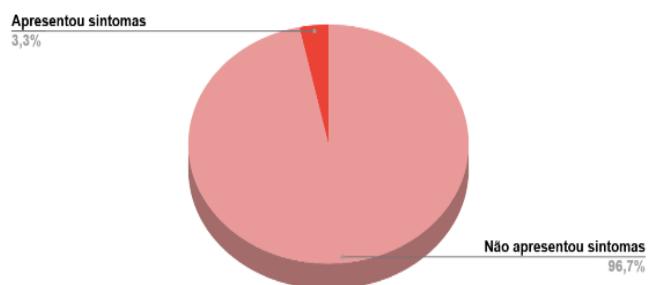


Figura 46 — Doenças ocasionadas pelo consumo de água contaminada: (A) amebíase, (B) ascaridíase, (C) giardíase, (D) hepatite, (E) leptospirose. **Fonte:** elaborada pela autora.

O censo de 2022 retrata a mortalidade infantil no município estudado. A taxa de mortalidade foi de 11,46 óbitos por mil nascidos vivos. Outro fator relevante refere-se às taxas de internações por diarreia no Sistema Único de Saúde (SUS), que atinge 1,3 por 100 mil habitantes (IBGE, 2022).

Contudo, o estudo averiguou, com base nas respostas dos entrevistados, a ocorrência de possíveis doenças causadas pela contaminação da água dos centros de distribuição. 2,2% dos(as) entrevistados(as) relataram sintomas de amebíase, que é uma infecção parasitária causada por protozoários do gênero *Entamoeba*, sendo a *Entamoeba histolytica* a principal responsável pela doença em humanos. A transmissão ocorre pela ingestão de alimentos ou água contaminados com cistos do parasita (Silva, 2021).

Cerca de 8,9% dos entrevistados relataram ter sido afetados pela ascaridíase. A doença é causada pelo helminto *Ascaris lumbricoides*, parasitose intestinal comum no Brasil, cuja transmissão se dá pela ingestão de ovos presentes no solo contaminado, condição causada por práticas inadequadas de higiene e saneamento (Machado, 2024).

Outra doença comum pela contaminação da água é a giardíase. 11,1% dos(as) entrevistados(as) indicaram ter sentido sintomas associados a essa doença. A enfermidade é causada por infecção pelo protozoário *Giardia lamblia*, cujos sintomas são gastrointestinais, afetando a qualidade de vida dos pacientes. A transmissão ocorre pela ingestão de água ou alimentos contaminados, ou por contato direto com superfícies infectadas pelo parasita (Silva; Mesquita; Aldeman, 2024).

No que tange à hepatite, o estudo somou 11,1% dos entrevistados. Essa doença pertence ao grupo de doenças infecciosas, gerando inflamação do fígado, com diferentes etiologias virais, sendo as hepatites A, B e C as mais comuns. A hepatite A é frequentemente transmitida pela ingestão de água ou alimentos contaminados, favorecida por deficiências em saneamento básico (Pecora, 2010). Por fim, 3,3% dos entrevistados relataram sintomas associados à leptospirose. Causada pela bactéria do gênero *Leptospira*, é uma zoonose de relevância crescente no contexto de saúde pública, propagada pelo contato com água ou solo contaminados pela urina de animais infectados, incluindo roedores (Morais, 2021).

Outro assunto abordado pelo estudo é a coleta seletiva dos resíduos sólidos e suas complicações. A ABNT, por meio da NBR 12.980:1993, define coleta seletiva como a remoção dos resíduos previamente separados pelo gerador. Por outro lado, a Resolução do CONAMA n.º 275 de 25/04/2001 estabelece, em seu Art. 1º, um código de cores para os diversos tipos de

resíduos, que é utilizado na identificação de coletores e transportadores, além de presente em campanhas de conscientização sobre a temática.

Nesse cenário, a representação das cores para os objetos correspondentes está listada na Figura 47: vermelho para plástico; azul para papel e papelão; verde para vidro; amarelo para metal; preto para madeira; laranja para resíduos perigosos; branco para resíduos ambulatoriais e de serviços de saúde; roxo para resíduos radioativos; marrom para resíduos orgânicos; cinza para resíduos não recicláveis, misturados ou contaminados que não podem ser separados.

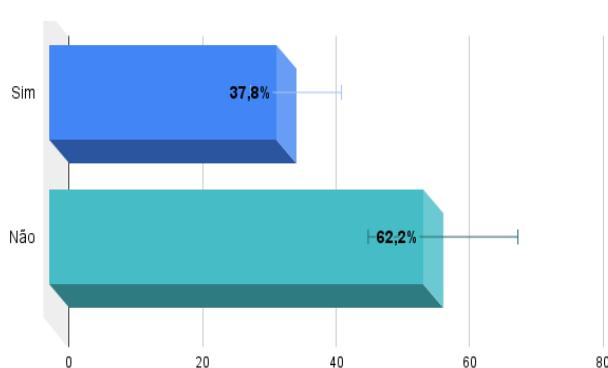
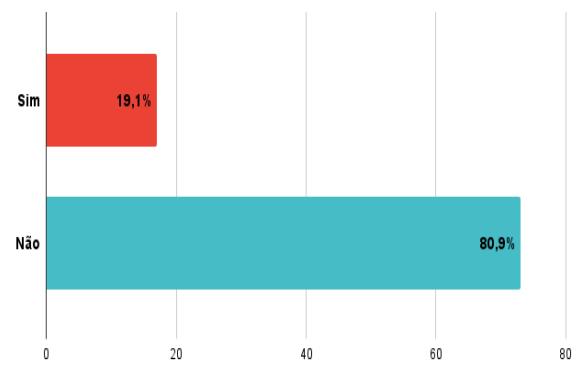
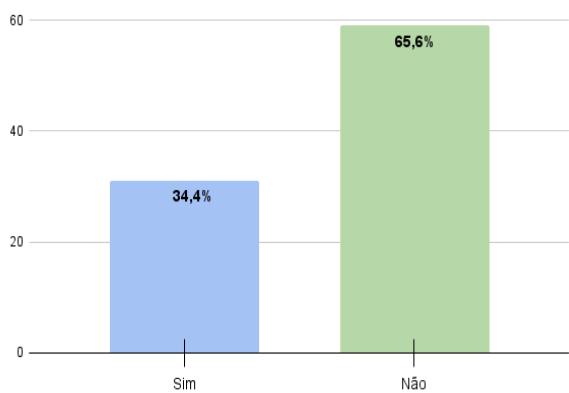
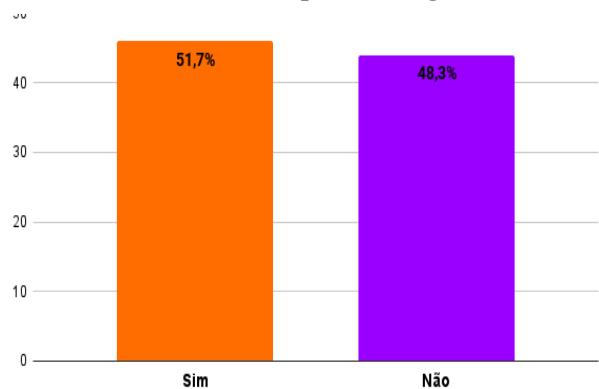
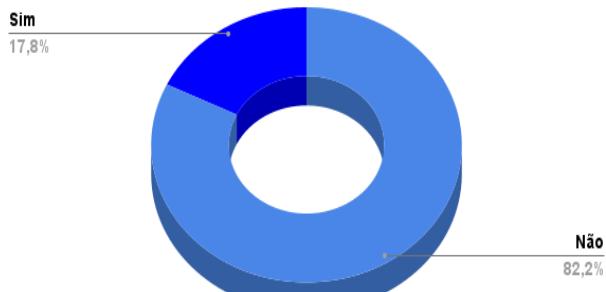
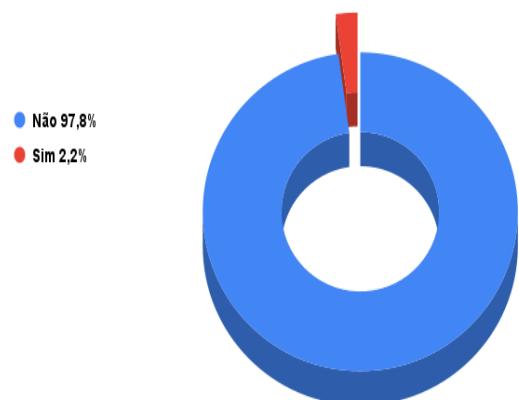


Figura 47 — Identificação das cores da coleta seletiva. **Fonte:** CONAMA 275/2001 “, adaptada pela autora

A análise dos dados de campo revela um significativo desconhecimento da população acerca de iniciativas de reciclagem. Embora a coleta seletiva e a reciclagem constituam

processos fundamentais para a sustentabilidade ambiental, verificou-se que a maioria dos(as) entrevistados(as) não está familiarizada com conceitos básicos, como ecopontos.

Os resultados indicam na Figura 48, especificamente, que 62,2% dos participantes desconhecem o conceito de coleta seletiva; 65,6% ignoram se o município oferece tal serviço; e 80,9% não têm conhecimento sobre a existência de cooperativas de catadores de materiais recicláveis. Adicionalmente, apenas 51,7% conhecem os locais para o descarte de resíduos especiais.

Coleta seletiva - Figura A**Cooperativa de catadores de materiais recicláveis
Figura B****Coleta seletiva municipal - Figura C****Coletas de materiais especiais (pilhas, baterias, eletrônicos e lâmpadas) – Figura D****Triagem de materiais recicláveis - Figura E****Ecoponto municipal - Figura F**

Catador autônomo de material reciclado - Figura G

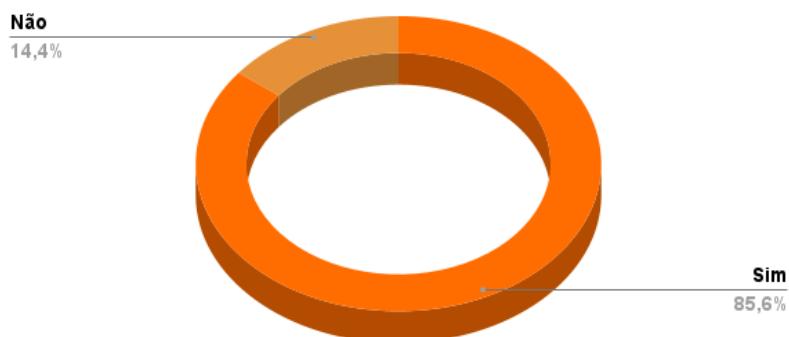


Figura 48 — Levantamento do conhecimento da comunidade do município em relação aos meios de coleta seletiva: (A) coleta seletiva, (B) Cooperativa de catadores de materiais recicláveis,(C) Coleta seletiva municipal, (D) Coletas de materiais especiais, (E) Triagem de materiais recicláveis, (F) Ecoponto municipal, (G) Catador autônomo de material reciclado. **Fonte:** elaborada pela autora

Esse cenário evidencia lacunas no acesso à informação, bem como a necessidade de maior transparência e divulgação das iniciativas disponíveis. A partir da análise, identificam-se diversos fatores que contribuem para essa desinformação. Entre eles, destaca-se a educação ambiental insuficiente, tanto em escolas quanto nas comunidades, o que limita a conscientização sobre a relevância do tema (Carvalho, 2020).

Além disso, há falhas na comunicação, sejam por parte dos órgãos públicos, sejam provenientes das empresas privadas, no processo de divulgação das informações relativas aos programas de reciclagem (Júnior, 2020).

Na área social, a educação ambiental é uma excelente ferramenta de sensibilização, à medida que informa e forma indivíduos sobre a importância da proteção do meio ambiente, fomentando a preservação dos recursos naturais e promovendo o desenvolvimento sustentável, bem como a qualidade de vida (Souza *et al.*, 2017).

Uma temática relevante para os resíduos orgânicos é o contexto da compostagem, prática essencial para a gestão de resíduos, considerando que a maioria do lixo gerado é composta por matéria orgânica (Reis, 2024). Infelizmente, dados do estudo evidenciam que 77,5% dos(as) entrevistados(as) desconhecem o tema compostagem, enquanto 95,6% desconhecem a existência de centrais de compostagem no município, conforme a Figura 49:

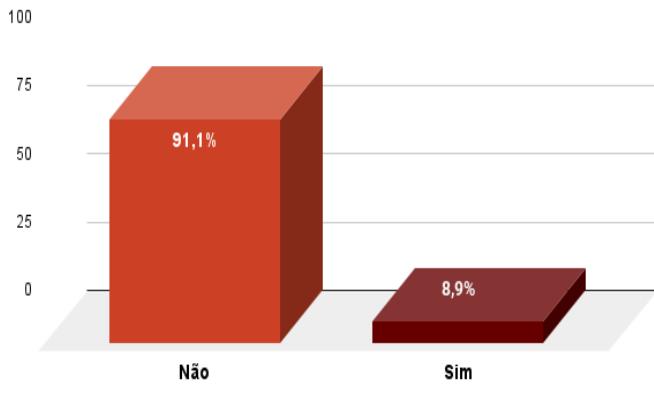
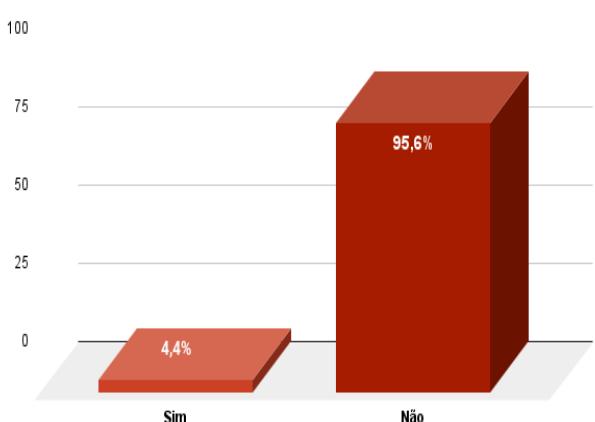
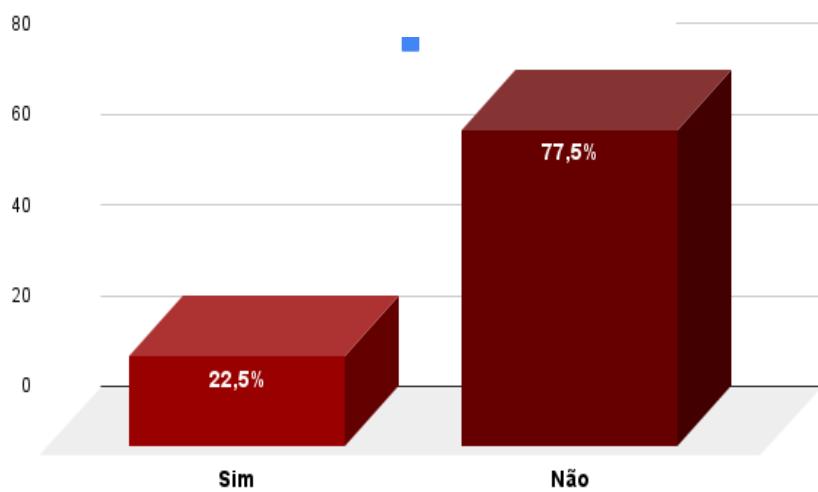
Compostagem doméstica – Figura A**Central de compostagem – Figura B****Compostagem – Figura C**

Figura 49 — Panorama geral em conhecimento sobre compostagem: (A) Compostagem doméstica, (B) central de compostagem, (C) realização de compostagem doméstica. **Fonte:** elaborada pela autora

A mobilização revelou que 91,1% dos indivíduos não praticavam compostagem doméstica. Esse fato destaca a urgência de intervenções educacionais com foco na prática doméstica, tornando-as mais acessíveis e eficazes para reduzir o desperdício orgânico (França *et al.*, 2024).

5.4. Conclusão

Este estudo revelou deficiências na qualidade da água dos centros de distribuição. As principais queixas dos(as) entrevistados(as) referiram-se à turbidez, à presença de materiais sólidos, ao odor e ao sabor desagradáveis. A correlação entre as interrupções de abastecimento e a turbidez relatada aponta para falhas no sistema de distribuição e na eficácia do tratamento durante eventos chuvosos.

Diante disso, é essencial a implementação de melhorias nos processos de purificação e um maior foco na comunicação pública sobre as fases do fornecimento e os riscos de contaminação, a fim de minimizar os impactos na saúde pública e no bem-estar da população. A pesquisa destacou, ainda, um paradoxo: embora haja um consenso unânime sobre a essencialidade do consumo de água tratada, constata-se uma disparidade nas práticas de consumo, visto que uma parcela expressiva ainda utiliza água diretamente da torneira.

A mitigação dos riscos associados a essa prática passa por campanhas educativas para promover métodos seguros de filtragem e incentivos econômicos que facilitem o acesso a sistemas de purificação, com o objetivo de reduzir os riscos à saúde decorrentes do consumo de água de qualidade duvidosa. Outro fator relevante identificado foi o amplo desconhecimento da população sobre práticas fundamentais de reciclagem, pois um número elevado de indivíduos ignora conceitos como coleta seletiva, ecopontos, compostagem e seus respectivos benefícios. Esse cenário reforça a necessidade de programas de educação ambiental e da melhoria na comunicação sobre as políticas de gestão de resíduos do município, ainda que o serviço seja terceirizado.

Para sanar essa deficiência, propõe-se desenvolver campanhas informativas em mídias diversas, a fim de alcançar o maior número de pessoas, com integração da temática da reciclagem nos programas curriculares das escolas municipais, de modo a promover uma cultura sustentável desde a infância. Tais lacunas no conhecimento e na prática são um reflexo direto da ausência de programas educacionais estruturados.

REFERÊNCIAS

ÁVILA, A. R. S. et al. **Melhoria da qualidade da água de lagos urbanos com uso de Wetland construído.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Goiás, Goiânia/GO, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12980:** coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

BARROS, R. A O. **Fatores que influenciam o processo de decisão de compra do consumidor:** um estudo de caso em um comércio varejista no ramo de purificadores de água na cidade de Fortaleza/CE. 2015. Monografia (Bacharelado em Administração de Empresas) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2015.

BORTOLI, J. **Qualidade físico-química e microbiológica da água utilizada para consumo humano e dessedentação animal em propriedades rurais produtoras de leite na região do vale do Taquari/RS.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Desenvolvimento) – Centro Universitário Univates, Lajeado/RS, 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 275, de 25 de abril de 2001. Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos [...]. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, p. 129, 28 jun. 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs.** Brasília: Funasa, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 7 maio 2021, p. 127. Disponível em: <https://www.gov.br/conselho-nacional-de-saude/pt-br/atos-normativos/resolucoes/2012/resolucao-no-466.pdf/view>. Acesso em: 8 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde; Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012. Aprova diretrizes e normas regulamentadoras de pesquisas envolvendo seres humanos. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 13 jun. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/conselho-nacional-de-saude/pt-br/atos-normativos/resolucoes/2012/resolucao-no-466.pdf/view>. Acesso em: 8 dez. 2024

CARVALHO, E. A. **Educação ambiental, ecopedagogia e sustentabilidade.** São Paulo: Dialética, 2020.

COELHO, A. O. **Mulheres gestoras e mães sozinhas: desafios e estratégias na conciliação entre carreira e maternidade.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Empresariais) – Universidade Fernando Pessoa, Porto, Portugal, 2019.

FRANÇA, G. T. H. **Compostagem como uma ferramenta de gerenciamento de resíduos orgânicos em escolas de ensino fundamental.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte,

Natal/RN, 2024.

FREITAS, J. da S. Variação demográfica e diminuição da taxa de natalidade familiar no Brasil. **Revista Brasileira de Demografia**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 45–60, 2011.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS ESTATÍSTICOS. **SEADE população**. São Paulo: SEADE, 2023. Disponível em: <https://populacao.seade.gov.br/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**: acesso à água e esgotamento sanitário 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/45f7422705c07ef3409d076fd95bd516.pdf. Acesso em: 8 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. **Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2024**. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2024/estimativa_dou_2024.pdf. Acesso em: 12 out. 2024.

IBGE. **População em Áreas de Risco no Brasil – 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 20 dez. 2024.

IBGE. Cidades. **Bebedouro**: panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bebedouro/panorama>. Acesso em: 20 dez. 2024.

LOPES, L. S. **Avaliação do desempenho de estações de tratamento de água, sob a ótica da fiscalização regulatória**: um estudo de caso em Santa Catarina. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

MACHADO, K. L. B. Parasitológico intestinal: fatores relacionados à ocorrência de áscaris em crianças em idade escolar. **Revista CPAQV — Centro de Pesquisas Avançadas em Qualidade de Vida**, v. 16, n. 1, 2024.

MANGELLI, L. N. R. **Estudo de poluentes orgânicos por GCXGC/TOFMS em lodo gerado em ETA por coagulação convencional e a utilização de um biopolímero à base de tanino**. 2023. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) — Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Painel de monitoramento de nascidos vivos**. Disponível em: <http://plataforma.saude.gov.br/natalidade/nascidos-vivos/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MIOTO, R. C. T.; CAMPOS, M. S.; CARLOTO, C. M. **Familismo direitos e cidadania: contradições da política social**. São Paulo: Cortez, 2015.

MORAIS, M. C. **Caracterização epidemiológica da leptospirose felina.** 2021. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal/SP, 2021.

OLIVEIRA, A. P. **Impactos da implantação de um sistema simplificado de tratamento de água em área rural:** estudo de caso em escola de Monte Verde, Juiz de Fora. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitarista e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora/MG, 2024.

OLIVEIRA, D. M. S. **Avaliação de parâmetros qualitativos da água na rede de distribuição de Delmiro Gouveia-Alagoas.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia/AL, 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Water and sanitation.** Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 18 jul. 2022. Disponível em: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/water-and-sanitation>. Acesso em: 30 jun. 2024.

PECORA, I. L. **Doenças de veiculação hídrica.** São Paulo: Atlas, 2010.

REALI, M. A. P.; PAZ, L. P. S; DANIEL, L. A. Tratamento de água para consumo humano. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologias e gestão,** Rio de Janeiro, p. 17-363, 2019.

REIS, D. K. F. **A promoção da alfabetização científica e formação de sujeitos sensibilizadores e conscientes: a compostagem como recurso lúdico interdisciplinar.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual do Maranhão, Zé Doca/MA, 2024.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água:** tecnologia atualizada. São Paulo: Blucher, 2021.

SANTOS, F. F. S. *et al.* **Adaptação do Indicador de Salubridade Ambiental (ISA) para análise do saneamento básico na cidade de Brejo Grande/SE.** 2016. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, 2016.

SILVA, B. R. N. **Aspectos epidemiológicos da amebíase (*entamoeba histolytica*) em crianças e adolescentes no Estado de Alagoas.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Enfermagem) – Faculdade UNIRB Arapiraca, Arapiraca/AL, 2021.

SILVA, M. C. A.; MESQUITA, F. S.; ALDEMAN, N. L. S. Complicações decorrentes das parasitoses intestinais: revisão bibliográfica e parasitos mais prevalentes. **Revista CPAQV — Centro de Pesquisas Avançadas em Qualidade de Vida,** v. 16, n. 1, 2024.

SOUZA, M. L. P.; FURTADO, G. D.; COSTA, D. A. Contexto histórico-cultural do termo “desenvolvimento sustentável” e suas implicações na responsabilidade social das empresas. **Contexto,** v. 10, p. 3, 2017.

URNHANI, R. **Lugar incerto**: o endereço como infraestrutura urbana e social. 2021. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo/SP, 2021.

WATANAVE, L. A. **A importância da exploração consciente das águas subterrâneas na área do Projeto Geoparque Corumbataí**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro/SP, 2021.

CAPÍTULO 6 — CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, foi realizado um estudo acerca das características físicas, químicas e de metais pesados provenientes da disposição de bioSSólido das estações de tratamento de esgoto, tanto da zona rural quanto da zona urbana do município de Bebedouro/SP. Para isso, o material foi coletado em fevereiro de 2024, sendo classificadas como urbanas as ETEs Jardim Itália, Jardim Pedro Paschoal, Jardim São Carlos e Mandembo, e como rurais as ETEs Botafogo e Turvínia.

A partir dos resultados das análises física, química e de micronutrientes, verifica-se que os dados das estações de tratamento de esgoto rurais, Botafogo e Turvínia, manifestaram potencial de melhoria de fertilidade do solo devido à alta concentração de fósforo, cálcio e magnésio. Considerando os números obtidos na estação de tratamento de esgoto urbana, a ETE Pedro Paschoal tem níveis excelentes de fósforo, indicado para solos com teor baixo desse material. Já a ETE Jardim Itália contribui para a melhoria da estrutura de solos arenosos ou ácidos, com boas quantidades de matéria orgânica.

As apurações da ETE São Carlos enfatizaram um equilíbrio de nutrientes, sendo opção versátil para o crescimento da fertilidade de solos agrícolas em geral, igualmente às ETEs rurais Botafogo e Turvínia. Os dados sugerem que os bioSSólidos das estações de tratamento de esgoto, devido à alta concentração de fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e matéria orgânica (MO), possuem potenciais para a utilização como fertilizante em solos, especialmente nas estações com pH entre ácido e neutro, com boa quantidade de micronutrientes.

No entanto, é fundamental monitorar a concentração de sódio e ajustar as práticas de aplicação para evitar impactos negativos na estrutura do solo. Ademais, a textura do solo produzida pelos bioSSólidos pode contribuir para melhorar a retenção de água em solos mais arenosos. Contudo, deve-se considerar a aplicação com cautela, principalmente em solos com muita capacidade de retenção.

De maneira geral, as evidências sugerem que os bioSSólidos provenientes da disposição das estações de tratamento de esgoto, quando adequadamente tratados e aplicados, podem contribuir significativamente para a fertilidade do solo. Diante disso, ao analisar as características de cada ETE, verificou-se que os bioSSólidos possuem características únicas, isto é, material adequado para diferentes tipos de solos e necessidades agrícolas. De acordo com o contexto, a utilização desses bioSSólidos pode solucionar eficazmente a baixa fertilidade do solo

de maneira sustentável.

Um ponto importante para este estudo são os resultados das análises dos metais pesados encontrados nos biossólidos provenientes da disposição das ETEs. Considerando as normativas da ABNT NBR 10004, 10005 e 10006, verificou-se que a ETE Mandembo possui elevado teor de óleos e graxas (25.863 mg/kg), expondo um problema na gestão do resíduo e limitando sua utilização no contexto agrícola.

Por outro lado, as ETEs Pedro Paschoal e Botafogo revelaram pH ácido (5), que é o limite para uso agrícola, fator que exige cuidado ao aplicar em solos com pH semelhante. A ETE Turvínia apresentou biossólido com pH neutro, baixa concentração de óleos e graxas e alta estabilidade, baixos níveis de contaminantes e menor teor de sólidos secos, sendo mais indicada para uso agrícola.

Entretanto, ao examinar os resultados da ABNT NBR 10005, os biossólidos das ETEs podem acumular elementos químicos devido à entrada de esgotos industriais e domésticos. Em vista disso, é necessário o monitoramento e controle das fontes, essenciais para garantir a segurança no uso e na disposição desses biossólidos.

Conforme pesquisas e estudo da ABNT NBR 10006, é importanteressaltar a necessidade de planejamento para mitigar os parâmetros reprovados, como chumbo e cádmio, e implementar processos de adsorção ou precipitação química para reduzir concentrações; no cromo total, ajustes nos processos de redução química para baixar os níveis abaixo do limite normativo; no fenol, a possibilidade de utilização de oxidação química ou processos de filtração avançados, como carvão ativado; no manganês e no ferro, avaliação da origem geológica ou industrial e implementação de precipitação química; no alumínio, aplicar técnicas de coagulação e filtração mais eficientes; por fim, no sódio, investigação das fontes de contaminação e adoção de sistemas de remoção por troca iônica.

Ademais, é necessário estabelecer um programa contínuo de verificação da conformidade dos parâmetros para prevenir novas não conformidades, de acordo com a normatização. O presente estudo revela que diversos parâmetros encontram-se acima dos limites permitidos pela ABNT NBR 10006, indicando possíveis contaminações químicas e orgânicas.

O biossólido estudado apresenta potencial para reaproveitamento em determinados casos, entretanto requer adequações para atender às normativas ambientais e de saúde pública. Há necessidade de uniformizar as práticas de tratamento e destinação final do biossólido para

melhorar os indicadores de sustentabilidade.

Uma sugestão para a municipalidade é a elaboração de um plano de ação para otimizar os biossólidos provenientes das ETEs, visando sustentabilidade e o Selo Município Verde Azul (PMVA). Esse selo foi criado em 2007 pelo governo do estado de São Paulo, pela Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do estado, que anteriormente era conhecida como Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Tal programa tem como objetivo motivar e apoiar as administrações municipais paulistas na formulação e implementação de políticas públicas estratégicas para o progresso sustentável do estado.

Para a obtenção do selo do Programa Verde Azul, é necessário que a gestão municipal priorize a melhoria da eficiência no tratamento de esgoto e da qualidade do biossólido gerado nas ETEs. Isso implica reduzir a contaminação desse material e promover a destinação ambientalmente adequada dos resíduos, visando ao pleno atendimento das normativas ambientais e ao alinhamento com as diretrizes da ABNT NBR 10004, 10005 e 10006.

Ademais, é imperativo garantir a qualidade dos recursos hídricos e a reutilização sustentável de resíduos, por meio da criação de políticas públicas voltadas ao reaproveitamento de recursos e à economia circular. Nesse sentido, a sensibilização da população e dos(as) gestores(as) públicos acerca da importância da gestão sustentável do biossólido constitui uma vertente fundamental para novas pesquisas em Educação Ambiental.

O município dispõe de uma área, antigamente conhecida como horto florestal, que, atualmente, encontra-se subutilizada e sem manutenção, com sua vegetação original degradada pelo tempo. É possível revitalizar essa localidade para a realização de projetos ambientais, transformando-a em um polo de recuperação florestal e de solo, bem como em um centro de estudos e projetos socioambientais, incentivando a educação ambiental e a mobilização social.

A implementação de tais projetos deve ocorrer em parceria com escolas, a gestão pública e a sociedade civil, enfatizando campanhas de Educação Ambiental e promovendo ações educativas sobre o descarte adequado de produtos químicos, óleos e outros contaminantes que afetam a qualidade do biossólido.

Para tanto, recomenda-se a elaboração de medidas de redução de contaminantes no biossólido. Isso inclui a identificação das fontes de poluição e o mapeamento de contribuições industriais e agrícolas que gerem contaminantes no esgoto, como metais pesados e fenol.

Traçar estratégias para estabelecer parcerias com empresas locais para implementar sistemas de pré-tratamento de efluentes antes do descarte na rede pública é uma opção.

Estabelecer um programa de monitoramento periódico do bioSSólido em todas as ETEs, que atualmente é executado a cada seis meses, ajuda a identificar e corrigir rapidamente desvios de qualidade. Outra forma de reaproveitamento sustentável do bioSSólido é um estudo de viabilidade do uso como componente em processos de compostagem, desde que atenda aos limites para contaminantes, respeitando a Resolução CONAMA n.º 375/2006.

Com base nas análises das ETEs estudadas, é possível identificar oportunidades para otimizar a gestão do bioSSólido proveniente da disposição das estações de tratamento de esgoto. Contudo, a implementação desse plano de ação integrará as ETEs a uma cadeia sustentável, o que contribuirá para a melhoria da qualidade ambiental e aumentando as chances de certificação pelo PMVA. Além disso, fortalecerá a imagem do município como referência em sustentabilidade, promovendo benefícios econômicos, educacionais, sociais e ambientais.

APÊNDICE

1Ap — Questionário socioambiental

QUESTIONÁRIO — POPULAÇÃO		
1	PERFIL SOCIOECONÔMICO	
Região de coleta e pesquisa:		
Subestação de tratamento de esgoto: () Distrital () Urbana		
1.1 Identificação de gênero: Binário: () Masculino () Feminino Não binário ()		
1.2 Faixa etária: () 18 a 29 anos () 30 a 39 anos () 40 a 49 anos () 50 a 59 anos () Acima de 60 anos		
1.3 Estado civil: () Solteiro(a) () Amasiado(a) () União estável () Casado(a) () Divorciado(a) () Viúvo(a)		
1.4 Quantas pessoas moram na residência? () Adultos () Crianças		
1.5 Nível de escolaridade: () Analfabeto () 1º ao 5º ano do Ensino Fundamental (antigo primário) <u>incompleto</u> () 1º ao 5º ano do Ensino Fundamental (antigo primário) <u>completo</u> () 6º ao 9º ano do Ensino Fundamental (antigo ginásio) <u>incompleto</u> () 6º ao 9º ano do Ensino Fundamental (antigo ginásio) <u>completo</u> () Ensino Médio (antigo 2º grau) <u>incompleto</u> () Ensino Médio (antigo 2º grau) <u>completo</u> () Ensino Superior (faculdade) <u>incompleto</u> () Ensino Superior (faculdade) <u>completo</u> () Pós-graduado(a)		
1.6 Qual a renda familiar? () Até 1 salário mínimo () Até 2 salários mínimos () Até 3 salários mínimos () Até 4 salários mínimos () Acima de 5 salários mínimos () Preferiu não responder		
1.7 Tipo de residência: () Própria () Alugada () Cedida () Área verde () Assentamento () Invadida () Outros		
2	PERFIL DA QUALIDADE DA ÁGUA	
2.1 Tipo de abastecimento: () Empresa de saneamento (SAAEB) () Poço artesiano () Cisterna () Outros		
2.2 Há interrupções do abastecimento de água com frequência? () Sim () Não		
2.3 Se a resposta anterior for “sim”, qual a periodicidade? () Semanal () Mensal () Raro		
2.4 Aspecto da água em relação à cor: () Incolor () Turva () Amarelada		
2.5 Se “turva” ou “amarelada”, responder em qual situação: () Quando há interrupção do abastecimento de água () Quando há intensidade de chuva () Sempre é turva e amarelada		
2.6 Materiais sólidos visíveis: () Sim () Não		
2.7 Odor da água: () Há cheiro/odor () Não há cheiro/odor		
2.8 Qual a característica percebida no odor da água? () Odor de ovo podre () Odor de enxofre		
2.9 Sabor da água: () Possui sabor () Não possui sabor		
2.10 Se possui sabor, qual a característica identificada?		
2.11 Em qual temperatura a água chega à sua torneira? () Quente () Morna () Fria		
3	DOENÇAS OCASIONADAS POR CONSUMO DE ÁGUA CONTAMINADA	
3.1 Você tem conhecimento do quanto importante é o consumo de água tratada? () Sim () Não		

3.2 Você consome água filtrada? () Sim () Não, da torneira Se a resposta for afirmativa, é filtrada por () Filtro de barro () Purificador de água Se a resposta for “purificador de água” () Realiza troca do filtro de 4 em 4 meses () Realiza troca do filtro de 6 em 6 meses () Realiza troca do filtro 1 vez por ano () Nunca realizou a troca
3.3 Já apresentou sintomas de hepatite A? () Urina escura () Fezes claras () Amarelamento da pele e das mucosas () Febre () Calafrios () Sensação de fraqueza () Náusea () Perda de apetite () Fadiga
DOENÇAS ASSOCIADAS À E. COLI
3.4 Já apresentou sintomas de giardíase? () Dor abdominal () Diarreia () Febre () Náusea () Fraqueza () Perda de peso
3.5 Já apresentou sintomas de amebíase? () Dor abdominal () Diarreia () Febre e calafrios () Fezes com sangue ou muco
3.6 Já apresentou sintomas de leptospirose? () Febre alta () Dor de cabeça () Dor no corpo () Perda de apetite () Vômito () Diarreia e calafrios
3.7 Já apresentou sintomas de cólera? () Diarreia e vômitos intensos, havendo uma grave desidratação
3.8 Já apresentou sintomas de ascaridíase (lombriga)? () Dor abdominal () Enjoo () Dificuldade em evacuar () Perda de apetite
3.9 Já apresentou sintomas de febre tifoide? () Febre alta () Vômito () Dor na barriga () Prisão de ventre () Diarreia () Dor de cabeça () Perda de apetite () Perda de peso () Manchas vermelhas na pele
4 DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS
4.1 Você sabe o que é coleta seletiva? () Sim () Não
4.2 Seu bairro tem coleta seletiva regular pelo município? () Sim () Não
4.3 Tem conhecimento se há cooperativas de catadores de materiais recicláveis? () Sim () Não
4.4 Tem conhecimento se há central de triagem de materiais recicláveis? () Sim () Não
4.5 Tem conhecimento se há ecoponto no município? () Sim () Não
4.6 Tem conhecimento se há pontos de entrega voluntária de resíduos especiais (pilhas, baterias, óleo de cozinha) () Sim () Não
4.7 Tem conhecimento se há catador autônomo de material reciclado no município? () Sim () Não
4.8 Você sabe o que é compostagem? () Sim () Não
4.9 Tem conhecimento se há central de compostagem? () Sim () Não
4.10 Você realiza compostagem doméstica? () Sim () Não