

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ANÁLISE PREDITIVA E CENÁRIOS FUTUROS PARA MANEJO  
DE RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA NA  
BACIA HIDROGRÁFICA TIETÊ JACARÉ**

**JULIANA COSTA LEITE SHIRATORI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cali Laguna Achon

São Carlos  
2025

Shiratori, Juliana Costa Leite

Análise preditiva e cenários futuros para manejo de resíduos gerados no tratamento de água na bacia hidrográfica Tietê Jacaré / Juliana Costa Leite Shiratori -- 2025.  
138f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Cali Laguna Achon

Banca Examinadora: Fabiana Alves Fiore Pinto, Maria Clara Fava

Bibliografia

1. Resíduos gerados no tratamento de água. 2. Análise preditiva. 3. Cenários futuros. I. Shiratori, Juliana Costa Leite. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Juliana Costa Leite Shiratori, realizada em 22/09/2025.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Profa. Dra. Fabiana Alves Fiore Pinto (UNESP)

Profa. Dra. Maria Clara Fava (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo a Deus, por me permitir e me fazer capaz de concluir essa trajetória, por estar sempre a frente do meu caminho, iluminando e me mostrando a direção certa a seguir.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram, acreditaram em mim e me ensinaram o caminho do bem. Aos meus avós (*in memoriam*), tenho certeza de que eles olham por mim e me guiam lá de cima.

Ao meu esposo que cuidou dos nossos filhos e da nossa casa na minha ausência, obrigada por ser meu parceiro de vida e me apoiar sempre.

Aos meus filhos, que mesmo com lágrimas nos olhos compreenderam a minha ausência e meu cansaço quando não conseguia brincar, vocês são meu maior e melhor projeto.

À minha irmã que na reta final, ficou com as crianças para eu poder concluir este trabalho.

À minha sogra e meu sogro que ajudaram com as crianças quando as coisas apertaram, muito obrigada.

À minha cunhada Leny, que nos feriados e fins de semana vinha ajudar com as crianças, muita gratidão.

À minha orientadora Cali, que me ajudou bastante nessa jornada, me tranquilizando, orientando e sendo muito paciente.

À Larissa Pierinni, aluna de iniciação científica e amiga que montou os gráficos para mim em *phyton*, quando eu estava desesperada sem saber manusear o programa.

À minha amiga Bia, que sempre me ouvia e me ajudava com muita paciência.

A todos os professores que contribuíram para minha formação como profissional e pessoa.

## RESUMO

O manejo dos resíduos oriundos do tratamento de água de ciclo completo (LETA e ALAF) é um problema complexo para as concessionárias de água. Essa pesquisa tem por objetivo analisar o manejo destes resíduos em ETAs localizadas na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê – Jacaré (UGRHI 13), através do uso de indicadores estratégicos (IEs) como ferramenta de análise preditiva e criação de cenários futuros. Para alcançar os objetivos propostos, foi realizada uma revisão bibliográfica para embasamento teórico e seleção de indicadores mais relevantes (IDs), elaboração e aplicação de um formulário para coleta de dados em visita às ETAs, aplicação e análise de indicadores selecionados, seguido pela elaboração de três cenários (realista, otimista e pessimista) utilizando a metodologia de análise multicritério e proposta e aplicação de indicadores estratégicos em ETAs. Com a aplicação das técnicas de análise preditiva e cenários futuros foi possível realizar um diagnóstico e um prognóstico das ETAs e da situação dos corpos hídricos da UGRHI 13, através da construção de três cenários futuros (realista, otimista e pessimista). A aplicação do Score de Análise Preditiva permitiu visualizar o impacto dos indicadores qualitativos na geração do volume destes resíduos. Os cenários indicaram variações de volume final para o ano de 2035 bem relevantes. Os resultados mostraram ainda uma queda na qualidade da água dos corpos hídricos e a deficiência de pontos de monitoramento na bacia hidrográfica voltados para o abastecimento público, evidenciando um monitoramento mais relacionado com a qualidade da água dos corpos receptores. Foi proposto um conjunto de seis indicadores estratégicos (IEs) para cada um dos resíduos (LETA e ALAF), sendo que três destes comuns a ambos os resíduos, avaliando a geração destes de forma indireta.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA; Tratamento de água; Indicadores de desempenho; Água de lavagem dos filtros, *Benchmarking*.

## **ABSTRACT**

The management of waste from full-cycle water treatment (LTA and ALAF) is a complex problem for water utilities. This research aims to analyze the management of these wastes in WTPs located in the TIETÊ-JACARÉ Water Resources Management Unit (UGRHI 13), using strategic indicators (SIs) as a tool for predictive analysis and creation of future scenarios. To achieve the proposed objectives, a literature review was conducted to provide theoretical basis and select the most relevant indicators (SIs), a form for data collection during visits to the WTPs was developed and applied, and selected indicators were applied and analyzed. This was followed by the development of three scenarios (realistic, optimistic, and pessimistic) using the multicriteria analysis methodology. Strategic indicators were proposed and applied in WTPs. By applying predictive analysis techniques and future scenarios, it was possible to diagnose and forecast the WTPs and the situation of the water bodies in UGRHI 13, through the construction of three future scenarios (realistic, optimistic, and pessimistic). The application of the Predictive Analysis Score allowed us to visualize the impact of qualitative indicators on the volume of these wastes generated. The scenarios indicated significant variations in the final volume for the year 2035. The results also revealed a decline in the water quality of the water bodies and a lack of monitoring points in the watershed dedicated to public supply, highlighting a need for monitoring more closely related to the water quality of the receiving bodies. A set of six strategic indicators (SIs) was proposed for each waste (LTA and ALAF), three of which are common to both wastes, indirectly assessing their generation.

**Keywords:** WTP sludge; Water treatment; Performance indicators; Filter wash water; Benchmarking.

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. OBJETIVOS .....	14
1.1.1. <b>Objetivo geral</b> .....	14
1.1.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1. LODOS DECANTADORES (LETA) .....	15
2.2. ÁGUA DE LAVAGEM DOS FILTROS (ALAF) .....	22
2.3. DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA E ALAF) .....	25
2.4. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS .....	26
2.5. INDICADORES UTILIZADOS PARA RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA .....	29
2.6. IMPACTO DA QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA ANÁLISE A PARTIR DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA) .....	35
2.7. ANÁLISE PREDITIVA E CENÁRIOS FUTUROS .....	38
2.7.1. Análise multicritério para análise de cenários futuros .....	48
2.8. ANÁLISE CRÍTICA SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	49
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>58</b>
4.1. SELEÇÃO E AGRUPAMENTO DE INDICADORES .....	58
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS TIETÊ-JACARÉ (UGRHI-13) .....	62
4.3. APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS INDICADORES NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS TIETÊ-JACARÉ .....	66
4.4. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA NA UGRHI 13 – TIETÊ-JACARÉ .....	76
4.5. ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS PARA O LETA .....	84
4.6. ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS PARA A ALAF .....	101
4.7. COMPARATIVO DO VOLUME DE RESÍDUOS GERADOS (LETA E ALAF) NOS CENÁRIOS PROPOSTOS .....	113
4.8. PROPOSTA DE INDICADORES ESTRATÉGICOS (IEs) .....	117
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>123</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>126</b>
<b>APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO DE PESQUISA - PESQUISA SOBRE RESÍDUOS GERADOS EM ETAS</b> .....	<b>126</b>
<b>ANEXO A – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA - CEP</b> .....	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do tratamento de água ciclo convencional, ilustrando a geração de resíduos nas etapas deste processo.....	16
Figura 2 - Remoção de lodo dos decantadores de forma manual.....	17
Figura 3 - Tipos de tratamento para lodo de ETA.....	22
Figura 4 - Faixas de classificação IQA- CETESB.....	377
Figura 5 - Cálculo de IQA.....	37
Figura 6 - Formas de aplicação da análise preditiva no setor de saneamento.	40
Figura 7 - Cenários propostos (otimista, realista e pessimista).....	422
Figura 8 - Análise da exploração dos recursos hídricos.....	44
Figura 9 - Projeção da geração de RSU em Curitiba para o período.....	46
Figura 10 - Fluxograma revisão sistemática sobre lodo de estação de tratamento de água (ETA).....	50
Figura 11 - Fluxograma da metodologia adotada para busca de publicações científicas em base de dados.....	51
Figura 12 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	54
Figura 13 - Gráfico de distribuição dos indicadores propostos por categoria ...	57
Figura 14 - Localização geográfica da UGRHI 13 (Tietê- Jacaré).....	651
Figura 15 - Delimitação das Sub-bacias da UGRHI 13 (Tietê- Jacaré).....	665
Figura 16 – Gráfico dos percentuais da localização das ETAs (ID 04) e da localização dos pontos de captação (ID 05).....	696
Figura 17 - Gráfico dos percentuais dos pontos de captação protegidos por vegetação nativa (ID 06); Porcentagem das ETAs por tipo de coagulante utilizado (ID 07), respectivamente.....	69
Figura 18 - Gráfico do grupo de indicadores de Gestão (ID 08 A ID 16).....	720
Figura 19 - Gráfico do grupo de indicadores operacionais (ID 17 A ID 18).....	72
Figura 20 - Gráfico do grupo de indicadores destinação do resíduo (ID 19 ao ID 24).....	742
Figura 21 - Gráfico do grupo de indicadores infraestrutura (ID 25 ao ID 27)..	754
Figura 22 - Gráfico do grupo de indicadores planejamento (ID 28 ao ID 30) .	765
Figura 23 - Gráfico dos valores de IQA por ponto de monitoramento entre (2013-2023) da UGRHI 13.....	796
Figura 24 - Gráfico da evolução histórica (2013-2023) e projeção do IQA (2024-2035) por ponto de monitoramento.....	79

Figura 25 - Equação para cálculo da diferença de volume de resíduos gerados em termos percentuais de um cenário para o outro .....	83
Figura 26 - Equação para cálculo do score de análise preditiva(SAP).....	115

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Teor de sólidos em amostras de LETA para diferentes períodos de adensamento.....	18
Tabela 2 - Métodos empíricos para estimativa de lodo .....	20
Tabela 3 - Cronologia dos aspectos normativos sobre a temática do saneamento no Brasil .....	26
Tabela 4 - Indicadores relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água .....	322
Tabela 5 - Lista de eventos, probabilidade e favorabilidade para o setor de saneamento.....	41
Tabela 6 - Cenários de crescimento populacional e área impermeabilizada até 2050 em São Carlos.....	43
Tabela 7 - Indicadores presentes na literatura e utilizados para estimativa dos impactos de geração de RSU na cidade de Curitiba .....	45
Tabela 8 - Indicadores presentes na literatura e utilizados para estimativa dos impactos de geração de RSU na cidade de Curitiba .....	47
Tabela 9 - Caracterização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê- Jacaré .....	63
Tabela 10 - Indicadores gerais ID 01, ID 02, ID 03, análise quanto a universalização.....	68
Tabela 11 - Cenário realista para estimativa do volume de LETA.....	89
Tabela 12 - Cenário otimista para estimativa do volume de LETA.....	95
Tabela 13 - Cenário pessimista para estimativa do volume de LETA .....	99
Tabela 14 - Cenário realista para estimativa do volume de ALAF .....	103
Tabela 15 - Cenário otimista para estimativa do volume de ALAF .....	108
Tabela 16 - Cenário pessimista para estimativa do volume de ALAF .....	111
Tabela 17 - Comparativo do volume de resíduos gerados nos cenários propostos .....	114
Tabela 18 - Indicadores estratégicos propostos para os resíduos gerados no tratamento de água – LETA e ALAF .....	118
Tabela 19 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos gerais nas ETAs .....	119
Tabela 20 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos para LETA nas ETAs.....	120

Tabela 21 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos para ALAF nas ETAs.....	122
---	-----

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Estimativa de produção de lodo de acordo com o tipo de manancial .....	19
Quadro 2 - Caracterização da ALAF de uma ETA no interior do estado de São Paulo .....	24
Quadro 3 - Indicadores gerais relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água .....	32
Quadro 4 - Indicadores individuais relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água .....	333
Quadro 5 - Indicadores propostos para gestão dos resíduos gerados em ETA	344
Quadro 6 - Principais publicações relacionadas a Análise preditiva e cenários futuros aplicados ao saneamento e resíduos .....	52
Quadro 7 - Matriz de classificação de cenários .....	57
Quadro 8 - Seleção de indicadores para aplicação nos resíduos do saneamento .....	599
Quadro 9 - Análise das equações e erros relativos do modelo de regressão misto em cada ponto de monitoramento .....	77
Quadro 10 - Estimativa de volume de LETA baseado em dados da literatura e universalização .....	85
Quadro 11 - Critérios adotados para os indicadores e índice baseados na análise multicritério .....	87
Quadro 12 - Áreas das Estações de Tratamento de Água .....	91
Quadro 13 - Critérios estabelecidos para os indicadores selecionados na análise multicritério .....	102

## 1. INTRODUÇÃO

O direito à água potável e de qualidade e às instalações sanitárias foi reconhecido como um direito pela Organização das Nações Unidas (ONU). A demanda pelo uso de água no Brasil é crescente, e estima-se que até o ano de 2030 as retiradas de água aumentem em 30%. Além disso, 58% dos municípios brasileiros são abastecidos por água superficial, e considerando que 80% da água utilizada para o abastecimento público retorna ao meio ambiente na forma de esgoto sanitário, pode-se prever uma piora da qualidade dos corpos hídricos, devido ao baixo índice de tratamento de esgoto atual (ANA, 2017).

Devido a esse aumento da demanda pelo uso da água, será necessária uma ampliação dos sistemas de abastecimento de água no país, o que conseqüentemente acarretará o aumento do volume da geração dos resíduos deste processo. Portanto, torna-se essencial o uso de ferramentas de planejamento e gerenciamento, a fim de assegurar não somente o abastecimento público de água, como também o adequado manejo e tratamento para os resíduos.

No Brasil, a maior parte das estações de tratamento de água utiliza o tratamento de ciclo completo, o qual tem como produto a água potável dentro dos limites estabelecidos em portaria do Ministério da Saúde. Os resíduos gerados neste processo são o lodo dos decantadores (LETA) e a água de lavagem dos filtros (ALAF).

O lodo é classificado pela Lei nº 12305/10 (Política Nacional de Resíduos Sólidos), como um resíduo de saneamento básico, que deve receber tratamento e destinação ambientalmente adequada, de forma a não poluir os recursos naturais, principalmente os corpos hídricos (Brasil, 2010).

O LETA é um tipo de resíduo cujas características podem variar muito, pois estão relacionadas com alguns aspectos, tais como: a qualidade da água bruta, os produtos químicos que são utilizados no processo de tratamento e as reações químicas ocorridas durante o processo, e o intervalo e forma de remoção destes resíduos das unidades. Essa variabilidade das características do lodo é o que torna a sua destinação um desafio para as unidades de tratamento de água.

Diante disto, o desenvolvimento de práticas de gestão é fator crucial para a melhoria da eficiência dos processos, minimizando os impactos ambientais, sociais e econômicos, alcançando a sustentabilidade ambiental dos sistemas de abastecimento de água (Silva, 2021).

O manejo dos resíduos oriundos do tratamento de água é um desafio histórico que afeta as concessionárias, órgãos públicos e a sociedade em geral. Portanto, é preciso analisar os fatores que contribuem para este cenário das ETAs, pois a partir deste diagnóstico, pode ser traçado um prognóstico através da aplicação de modelos de análise preditiva que contemplem diferentes cenários para visualizar o futuro.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é desenvolver um diagnóstico e prognóstico para manejo dos resíduos provenientes do tratamento de água em Estações de Tratamento de Água localizadas na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13), além de propor indicadores estratégicos para ETAs.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- I) Diagnosticar a situação atual dos resíduos gerados no tratamento de água nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré através de indicadores;
- II) Analisar métodos preditivos e desenvolver cenários futuros para a gestão de resíduos do tratamento de água na Bacia Hidrográfica Tietê- Jacaré;
- III) Propor um conjunto de indicadores estratégicos (IEs) para os resíduos gerados no tratamento de água.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os resíduos gerados no tratamento de água são basicamente dois: o lodo gerado nos decantadores, também conhecido como LETA, e a água de lavagem dos filtros (ALAF). Estes resíduos apresentam grande variabilidade nas suas características, o que torna o seu descarte um grande desafio para os gestores das ETAs.

### 2.1. LODOS DECANTADORES (LETA)

O tratamento de água assemelha-se a um processo industrial, no qual concessionárias transformam água bruta em potável através da aplicação de produtos químicos e processos alinhados aos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Como todo processo industrial, essa atividade gera resíduos, demandando das companhias de saneamento a adoção de gestão e políticas sustentáveis para o manejo de seus resíduos (Oliveira e Rondon, 2016).

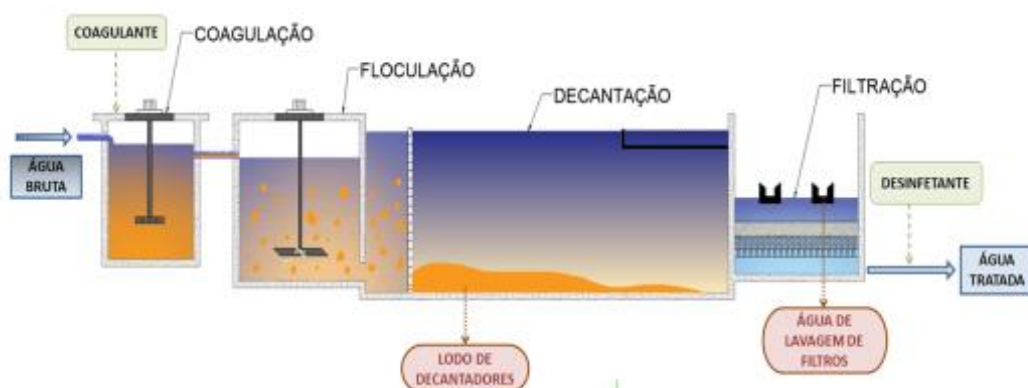
Diante da problemática da gestão de resíduos e da preocupação crescente com questões ambientais, tem-se observado um crescimento significativo de investimentos em tecnologias e métodos sustentáveis, com destaque para a reciclagem de resíduos sólidos urbanos, com foco na economia circular.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), que classifica o lodo de ETA como um resíduo sólido urbano classe IIA (perigoso e não inerte), o futuro do manejo deste resíduo sinaliza para sua valorização, podendo ser empregado como matéria-prima de outro processo (Sousa *et al.*, 2025).

A qualidade da água do manancial de captação implica na escolha das tecnologias a serem empregadas no processo de tratamento de água, na quantidade de processos, tipos e quantidade de produtos químicos a serem utilizados e infraestrutura necessária para o tratamento (Silva, 2021).

No Brasil, o tratamento de água de ciclo completo ainda é o mais empregado. Esse tratamento é composto das seguintes fases: captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Etapas do tratamento de água ciclo convencional, ilustrando a geração de resíduos nas etapas deste processo



Fonte: Silva, 2021.

Através dos processos de floculação, decantação e com a adição de produtos químicos (coagulantes), é feita a remoção dos sólidos em suspensão e da matéria orgânica no tratamento de ciclo completo. A escolha do coagulante está intrinsecamente relacionada com a qualidade da água bruta captada. Os coagulantes mais utilizados no Brasil são: os sais de alumínio e ferro. O processo de filtração é considerado a etapa final de remoção de impurezas da água, nesta fase são removidas as partículas em suspensão, coloidais e microrganismos (Silva, 2021).

Durante o processo de potabilização da água, os principais resíduos gerados nas ETAs são o lodo proveniente dos decantadores (LETA) e a água de lavagem dos filtros (ALAF) (Minatel *et al.*; 2024). Estima-se que o volume de resíduos gerados nas estações de tratamento de água no Brasil é de aproximadamente  $700 \text{ mil m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ , baseado na estimativa de geração de lodo em 5% do volume de água tratada (Minatel *et al.*, 2024).

A remoção do lodo dos decantadores pode ser feita de forma manual pelos operadores durante a limpeza do tanque, com o uso de rodos e jatos de água de alta pressão. Neste processo, dizemos que o lodo é gerado em batelada e possui concentrações de sólidos diversas a depender da quantidade de água utilizada durante a limpeza do decantador (Silva, 2021). A Figura 2 mostra operadores realizando a remoção de lodo de forma manual.

Figura 570 - Remoção de lodo dos decantadores de forma manual



Fonte: Achon e Cordeiro, 2003.

Outra forma de remoção do lodo é com o auxílio de dispositivos mecanizados instalados nesses tanques, como: ponte rolante, correias dispostas no fundo da unidade e raspadores de fundo. A frequência da retirada de lodo de forma mecanizada varia, podendo ser diária ou até em menores intervalos de tempo. Essa forma de retirada resulta na produção de maiores volumes de lodo se comparado à retirada manual (Silva, 2021).

O Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) consiste em um aglomerado de substâncias orgânicas e inorgânicas removidas da água durante o tratamento (De Sousa *et al.*, 2025). Suas características são influenciadas pela aplicação de produtos químicos, pela dosagem do coagulante utilizado e pelo tipo de decantador empregado, isso se deve em função das diferentes características da água bruta captada (Oliveira e Rondon, 2016).

Mensurar o volume de lodo produzido, caracterizar e destinar este resíduo é um grande desafio para as concessionárias. Um dos principais parâmetros utilizados para caracterizar o LETA é a concentração de sólidos totais. A adoção deste parâmetro é importante para analisar alternativas de tratamento e destinação final destes resíduos (Silva, 2021). A descaracterização dos sólidos presentes no LETA, como: tamanho, resistência específica, distribuição das partículas e compressibilidade, dentre outros, torna quase impossível prever uma forma de reuso ou destinação final adequada.

Em um estudo desenvolvido por Júnior *et al.* (2021), onde se comparou o teor de sólidos em amostras de lodo (LETA) coletadas de diferentes tipos de

decantadores, um convencional e um flocu-decantador, observou-se que, independentemente do tempo de adensamento, as amostras do decantador convencional apresentaram maior teor de sólidos. Após 1 hora de adensamento, percebe-se que a diferença do teor de sólidos do flocu-decantador (2,1%) e do decantador convencional (8%) permaneceu alta se comparado com o período de 24 horas, porém foi menor do que a diferença observada sem adensamento. Além disso, salienta-se que, para o período de 1 hora de adensamento, os resultados obtidos foram semelhantes aos das amostras sem adensamento, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 401 - Teor de sólidos em amostras de LETA para diferentes períodos de adensamento

Tipo de Tanque	Tempo de Adensamento (horas)		
	0	1	24
FLOCU-DECANTADOR	0,10%	0,40%	2,10%
DECANTADOR CONVENCIONAL	6,00%	6,00%	8,00%

Fonte: Júnior et al., 2021. Adaptado pela autora, 2025.

No Brasil, as unidades de tratamento de lodo ainda são raras. A prática mais comum ainda é o descarte de lodo *in natura* no corpo d'água mais próximo da estação de tratamento de água. Esse lançamento causa grandes impactos ambientais, como: aumento da taxa de assoreamento e concentração de metais na comunidade aquática, redução da capacidade de autodepuração dos rios, redução na disponibilidade destes corpos hídricos como área de lazer, dentre outros (Dutra de Oliveira *et al.*, 2023).

Para uma gestão eficiente dos resíduos oriundos do tratamento de água, é de suma importância a quantificação e caracterização desses resíduos, a fim de definir o sistema de tratamento a ser implementado. A literatura apresenta diferentes formas de estimativas de geração de lodo de ETA. Andreoli (2001), citado por Oliveira *et al.* (2016), estima uma geração de lodo de cerca de 5% da produção diária de água da ETA. Araújo (2006), *apud* Castro (1997), considera uma variação de 1 a 3% de resíduos em relação à água tratada. Richter (2001) considera que o volume de lodo produzido varia de 1 a 5% do volume diário de água produzida na ETA.

A qualidade da água bruta, o tipo e a dosagem do coagulante utilizado influenciam as características e o volume de lodo produzido em Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo. Reali (1999) destaca a importância de considerar as variações sazonais na qualidade da água do manancial, as quais impactam significativamente a produção e as características dos resíduos. O Quadro 1 nos apresenta dados da literatura para a estimativa da produção de resíduos em função da vazão diária de água tratada.

Quadro 1 - Estimativa de produção de lodo de acordo com o tipo de manancial

<b>Tipo de Manancial</b>	<b>Faixa de Produção de Resíduos (g de sólidos secos por m<sup>3</sup> de água tratada)</b>
Água de reservatório com boa qualidade	12-18
Água de reservatório com média qualidade	18-30
Água de rios com qualidade média	24-36
Água de reservatório com qualidade ruim	30-42
Água de rios com qualidade ruim	42-54

Fonte: Reali, 1999.

Os métodos mais empregados para determinação da geração de LETA são os que utilizam fórmulas empíricas ou balanço de massa. Esses métodos levam em consideração fatores relacionados à qualidade da água bruta (cor, turbidez), dosagem do coagulante utilizado no tratamento, aplicação de insumos auxiliares no processo de tratamento como cal, carvão ativado em pó (CAP) e a vazão da água tratada (Junior *et al.*, 2019).

Dentre os modelos utilizados estão o da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo CETESB (1987), o modelo de Kawamura (1991) e o modelo de Richter (2001), os quais estimam a produção de sólidos em matéria seca, em função de fatores relacionados à qualidade da água (Junior *et al.*; 1999). A Tabela 2 demonstra os métodos empíricos mencionados para quantificação dos resíduos sólidos, em base seca, gerados em ETAs de ciclo completo em massa (Kg) por metro cúbico de água tratada.

Tabela 402 - Métodos empíricos para estimativa da geração de sólidos em ETAs de ciclo completo.

Método	Descrição
CETESB  $P = (0,23 \times AS + 1,5 \times Tu)$	P- Estimativa de produção de sólidos em matéria seca (kg de matéria seca m <sup>-3</sup> de água bruta tratada). AS- Dosagem do coagulante (mg L <sup>-1</sup> ); Tu - Turbidez da água bruta (uT).
Kawamura  $P = (D \times Fc_1) + (Tu \times Fc_2)$	P- Estimativa de produção de sólidos em matéria seca (kg de matéria seca m <sup>-3</sup> de água bruta tratada). D- Dosagem do coagulante (mg L <sup>-1</sup> ); Fc1- Fator dependente do número de moléculas de água associadas a cada molécula de sulfato de alumínio proposto por Kawamura, que usualmente varia entre 0,23 a 0,26; Tu - Turbidez da água bruta (uT); Fc2 é a razão entre a concentração de sólidos em suspensão totais presentes na água bruta e turbidez da mesma, com faixa variante entre 1,0 a 2,0
Ritche  $P = 0,2 \times C + 1,3 \times Tu + k \times D$	P- Estimativa de produção de sólidos em matéria seca (kg de matéria seca m <sup>-3</sup> de água bruta tratada). C- Cor da água bruta; Tu - Turbidez da água bruta (uT); K - Relação estequiométrica na formação do precipitado de hidróxido de sódio; D- Dosagem do coagulante (mg L <sup>-1</sup> ).

Fonte: Junior, 2019. Adaptado pela autora, 2025.

Em um estudo conduzido por Katayama (2012) em seis estações de tratamento de água de ciclo completo, teve como objetivo comparar diferentes métodos de quantificação da geração de sólidos em ETAs, que inclui o LETA e a ALAF. Dentre os principais desafios para se aplicar as fórmulas empíricas foi encontrar os valores referentes a concentração de sólidos totais em suspensão (SST), pois este parâmetro medido frequentemente. Comumente, esse problema é resolvido modelando os valores de SST em função linear do parâmetro de turbidez da água bruta, que é um índice de medição mais recorrente e pode ser automatizado e obtido em tempo real.

Os resultados obtidos mostraram que o uso de fórmulas empíricas mostrou variações entre os volumes calculados de resíduos utilizando diferentes métodos. No entanto, observou-se que, quando a variável de sólidos suspensos

totais era quantificada em vez de correlacioná-la com a turbidez, os erros associados eram menores. A metodologia aplicada foi a quantificação da produção de resíduos (LETA e ALAF) através do balanço de massa, através dos dados de vazão e concentração de SST em todas as etapas de operação, sendo uma quantificação em massa seca e não em volume, sem separação do LETA e ALAF.

Apesar disso, as fórmulas empíricas representam um método inicial útil para a quantificação dos resíduos e estimativa da geração de lodo de ETAs e uma ferramenta importante para os gestores na tomada de decisões. A quantificação e caracterização do lodo produzido são etapas necessárias para a adoção de estratégias eficazes de gerenciamento.

O volume de resíduos gerados durante o processo de tratamento de água é resultado da eficiência do processo, da vazão captada e das características da água bruta. O principal objetivo dos sistemas de tratamento desses resíduos é separar a parte líquida (águas residuais) da parte sólida, a fim de reduzir o volume e, conseqüentemente, os custos com transporte e destinação ou disposição final (Silva, 2021).

Um estudo de Januário e Ferreira Filho (2007), citado por Calheiros da Costa (2011), mostra que os custos de transporte e disposição final do lodo de ETA em regiões metropolitanas têm uma variação significativa, variando entre 100 e 500 reais por tonelada, o que representa um impacto considerável nos custos operacionais. Em contraste, Roth (2008) aponta que a implantação de sistemas de tratamento de lodo em ETAs corresponde a uma parcela significativa do investimento inicial, estimada em torno de 30 a 40% do custo total de implantação de uma Estação de Tratamento de Água.

Em algumas situações, o montante do investimento não é o único obstáculo que impede a implantação de uma estação de tratamento de resíduos. É preciso levar em conta também a disponibilidade de espaço físico, haja vista que muitas estações de tratamento de água hoje estão inseridas em zonas urbanas altamente adensadas. Portanto, é preciso pensar em formas alternativas para as diferentes situações.

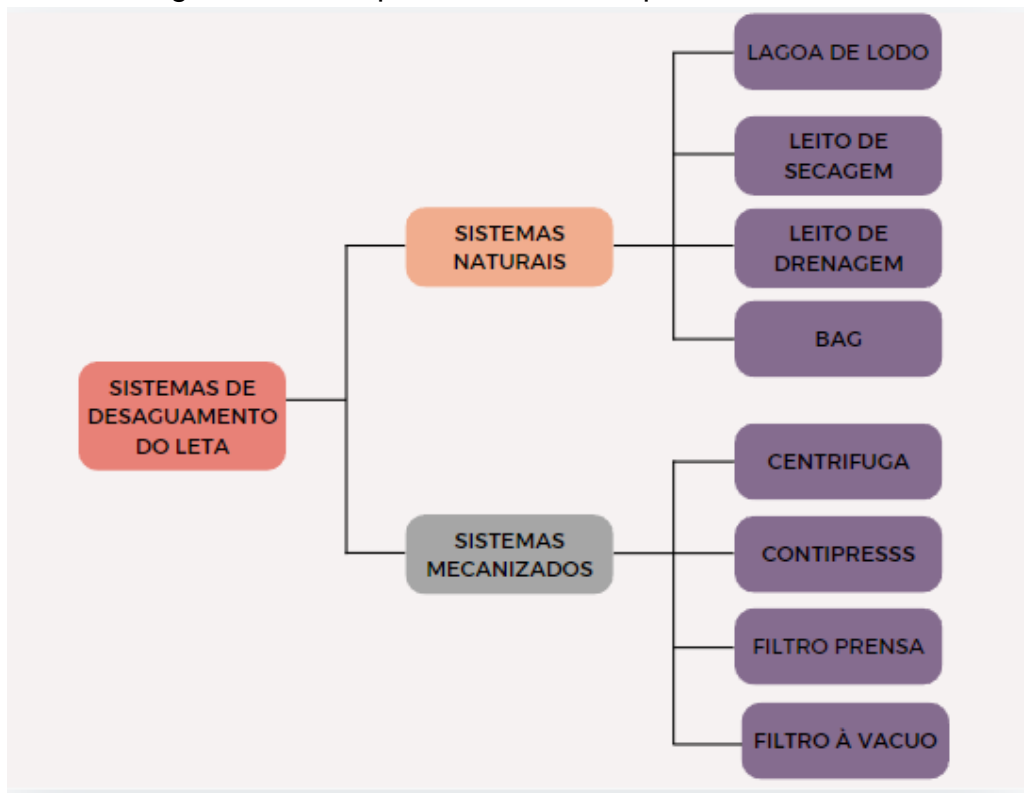
O tratamento de LETA envolve diversas etapas com regularização de vazão, adensamento, desaguamento, secagem e incineração. A etapa de adensamento pode ser feita por gravidade, flotação ou mecânico, a clarificação

do lodo visa o alcance de uma concentração de sólidos inferior a 8% (Júnior *et al.*, 2021).

O desaguamento do lodo pode ser feito de forma manual ou mecanizada. A determinação do tipo de sistema a ser utilizado depende de alguns fatores, como o tamanho da estação, sua localização, área disponível para implantação, custos de implantação, custos de operação, dentre outros (Reali, 1999).

Os sistemas naturais de desaguamento do lodo possuem um menor custo de implantação e operacionalização, porém necessitam de uma área maior que os sistemas mecanizados. Os métodos de desaguamento do lodo são apresentados no esquema da Figura 3.

Figura 1058 – Tipos de tratamento para lodo de ETA.



Fonte: Cordeiro, 1999. Adaptado pela autora, 2025.

A eficácia do processo de desaguamento do lodo está associada ao sistema adotado, porém o principal objetivo é a redução do teor de sólidos para até 35% (Russell *et al.*, 1996). Portanto, o volume final do lodo desaguado é determinado através do teor de sólidos atingido no processo de tratamento.

## 2.2. ÁGUA DE LAVAGEM DOS FILTROS (ALAF)

Os resíduos oriundos do tratamento de água têm características próprias com grande diversidade de composição, podendo ser sólidos e líquidos. O efluente líquido gerado nesse processo é a água de lavagem dos filtros (ALAF). Segundo Oliveira *et al.* (2012), a ALAF é considerada em termos volumétricos a maior quantidade de resíduo produzido nas estações de tratamento de água convencional, mas em termos mássicos a maior produção é o lodo oriundo dos decantadores (Molina, 2010).

Existem duas condições para determinar a hora de lavagem de um filtro na ETA e dois critérios para a escolha do filtro a ser lavado, que são:

- Se houver controle de turbidez no efluente de cada filtro, lava-se o filtro que apresentar pior resultado de turbidez;
- Em função da carreira de filtração, ou seja, do tempo de funcionamento do filtro. Sendo o último o critério mais utilizado nas ETAs, geralmente a lavagem acontece no intervalo de tempo de aproximadamente 24 horas de operação do filtro, preferencialmente fora dos horários de pico de consumo;

A lavagem dos filtros pode ser feita de diversas formas, resultando em volumes variados de resíduos líquidos. Um dos métodos mais utilizados consiste no uso de água em fluxo ascendente, o que demanda uma quantidade maior de água. O método que combina (ar e água) em sentido ascendente mostra uma maior eficiência em termos de redução do consumo de água durante o processo (Reali, 1999).

Normalmente, a água utilizada no processo de lavagem dos filtros, é parte da água tratada na própria estação. Para garantir a eficiência do processo de lavagem, a vazão aplicada deve ser suficiente para expandir o leito filtrante e provocar o desprendimento do material sólido acumulado nas carreiras de filtração. Esse procedimento exige uma vazão bem maior que a vazão utilizada durante a operação normal da estação, resultando na geração de grandes volumes de água residuária em um curto período (Campos *et al.*, 2014).

Em termos percentuais, a água de lavagem dos filtros (ALAF) pode corresponder a até 10% do volume total de água produzida por uma Estação de Tratamento de Água (Ismail *et al.*, 2020). A frequência de retro lavagem costuma ocorrer em média a cada 24 a 72 horas, e dura em média de 10 a 25 minutos.

A depender da estrutura e tamanho da estação, essa produção pode ser quase contínua, já que os filtros operam em paralelo e são lavados

alternadamente. Alguns fatores podem influenciar diretamente a geração de ALAF, tais como: infraestrutura da ETA, a quantidade de filtros e o volume de água tratada (Campos *et al.*, 2014).

A norma técnica brasileira ABNT NBR 12216:1992 – Projeto de Estações de Tratamento de Água, não especifica um valor de porcentagem do volume de água de retro lavagem em relação à vazão máxima de operação de uma ETA (ABNT, 1992).

Infelizmente, no Brasil, ainda é comum a prática do descarte da água de lavagem dos filtros no corpo d'água mais próximo da ETA ou encaminhar esta água residuária para as estações de tratamento de esgoto. Ambas as práticas não estão em conformidade com a legislação ambiental vigente. Uma alternativa que pode ser adotada e que talvez seja mais apropriada é a recirculação da ALAF dentro da própria estação de tratamento de água (Campos, 2014).

As estações de tratamento de água que operam utilizando a recirculação da ALAF o retorno desta ocorre geralmente entre o ponto de entrada da água bruta e o decantador. A água de lavagem destinada à recirculação não precisa passar por um tratamento completo, podendo em alguns casos passar por um tanque de equalização e eventualmente, ser submetida a um tratamento preliminar antes de retornar ao ciclo novamente (Campos, 2014). Cornwell e Lee (1993), Kawamura (1991) citados por Campos (2014), recomendam ainda que a vazão de recirculação da água de lavagem dos filtros (ALAF) permaneça abaixo de 10% da vazão da ETA.

Em um estudo conduzido por Ismail *et al.* (2020), que caracterizou e avaliou a qualidade da água de lavagem de filtros de uma estação de tratamento de água de ciclo completo do interior do estado de São Paulo e teve como objetivo avaliar a viabilidade de sua recirculação, revelou concentrações elevadas de diversos parâmetros de qualidade dessa água residuária, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Caracterização da ALAF de uma ETA no interior do estado de São Paulo

<b>Parâmetros estudados</b>	<b>Valores encontrados</b>
Cor aparente	1425uH
Turbidez	238,6uT
Sólidos Totais	253,0mg/L

<b>Parâmetros estudados</b>	<b>Valores encontrados</b>
Bactérias Heterotróficas	550UFC/ml
Coliformes Totais	1250UFC/100ml
Escherichia coli	240UFC/100ml
Ferro total	24,800 mg/l

Fonte: Ismail et al., 2020. Adaptado pela autora, 2025.

Diante dos resultados obtidos, ficou evidente que a recirculação da ALAF para o início da ETA, sem tratamento prévio, não é recomendada, pois os valores encontrados na análise são superiores aos da água captada.

A preocupação ambiental com o lançamento dos resíduos do processo de tratamento de água se deve à variabilidade das suas composições e características. Os resíduos de uma estação de tratamento de água contêm desde metais, microrganismos e, principalmente, uma elevada concentração de sólidos. O lançamento indevido destes resíduos nos corpos d'água pode provocar sérias alterações neste meio (Silva, 2021).

### 2.3. DESTINAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA E ALAF)

O lodo da estação de tratamento de água, apesar do seu alto teor de umidade, é considerado um resíduo sólido. Atualmente, ainda se tem a prática de descartar este resíduo *in natura* nos corpos hídricos ou no sistema público de esgotamento sanitário. Tal prática está em desconformidade com a Lei n° 12305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010, e com a Lei n° 9605 de 1998, que considera crimes ambientais tais práticas.

O encaminhamento do LETA para as estações de tratamento de esgoto deve se restringir a casos excepcionais, como em áreas urbanas altamente adensadas e estações de tratamento antigas sem espaço físico para instalação de uma estação de tratamento de lodo. Outra prática muito comum de destinação para este resíduo é o envio para o aterro sanitário, exigindo um processo de desaguamento deste resíduo devido às suas características desafiadoras, como alto teor de sólidos, alta plasticidade, baixa resistência ao cisalhamento, baixa permeabilidade à água, extrema compressibilidade e tixotropia (Urban *et al.*, 2019).

Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tem como objetivo fomentar outras práticas de gestão de resíduos, estabelecendo uma

ordem prioritária na gestão de resíduos: a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e, por fim, havendo sido esgotados todos os demais meios, a disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Estudos mostram que o lodo de estações de tratamento de água pode ser reaproveitado de diversas formas, agregando valor a este resíduo, reduzindo o descarte e os custos com transporte e disposição final.

A escolha da aplicação mais adequada depende das características do lodo e da proporção em que ele será incorporado a outro produto. Tsutiya e Hirata (2001) sugerem o uso na recuperação de solos degradados, com um controle de monitoramento rigoroso na concentração de alumínio e potenciais reações negativas no solo. Outra possibilidade é o emprego na indústria da construção civil, sendo incorporado em diversos elementos, conforme defendido por Andreoli (2001), que propõe a adição em argamassas, concretos e cerâmicas, em que as porcentagens incorporadas não comprometam as propriedades dos produtos.

#### 2.4. ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS

As legislações brasileiras relacionadas ao saneamento são relativamente recentes, mas refletem um progresso notável ao longo do tempo (Silva, 2021). A Tabela 3 mostra a cronologia do surgimento dos aspectos legais e normativos sobre a temática do saneamento no Brasil.

Tabela 595 - Cronologia dos aspectos normativos sobre a temática do saneamento no Brasil

<b>Legislação vigente sobre a temática do saneamento no Brasil</b>	
<b>Instrumento</b>	<b>Ano de Aprovação</b>
LEI Nº 6938 POLÍTICA NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (PNMA)	1981
CONSTITUIÇÃO FEDERAL, CAP. 4, ART. 225	1988
LEI Nº 9433 - POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH)	1997
RESOLUÇÃO CONAMA Nº 237	1997
LEI Nº 9605 - LEI DE CRIMES AMBIENTAIS	1998
ABNT NBR 10004	2004
RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357	2005
LEI Nº 11445 - DIRETRIZES NACIONAIS PARA O SANEAMENTO BÁSICO	2007
LEI Nº 12305 - POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)	2010
ABNT NBR ISO 24512	2010
LEI Nº 14026 – NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO	2020
ABNT NBR 10004	2024

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Lei nº 6.938, sancionada em 1981, instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA). Essa legislação tem como base dez princípios e diretrizes voltadas à preservação do meio ambiente (Brasil, 1981). A Constituição Federal de 1988, em seu Capítulo VI, dedica-se às questões ambientais, assegurando a todos o direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, essencial à qualidade de vida. O texto constitucional determina que a proteção ambiental e o combate à poluição são responsabilidades de todos os entes federados (Brasil, 1988).

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433 de 1997, define a bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da política e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Dentre os objetivos desse sistema estão o planejamento, a regulação e o controle do uso dos recursos hídricos, bem como a preservação e recuperação dos corpos d'água (Brasil, 1997). A PNRH também estabelece que o despejo in natura dos resíduos gerados no processo de tratamento de água em corpos hídricos passa a ser uma prática restrita, embora ainda não seja tipificado como crime ambiental (Brasil, 1997a).

Foi somente com a promulgação da Lei nº 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, que estabeleceu o respaldo legal necessário para a responsabilização criminal pelo lançamento in natura dos resíduos gerados nas Estações de Tratamento de Água. Antes da vigência desta lei, tais práticas eram tratadas apenas como infrações administrativas ou atividades poluidoras, sem implicações penais diretas (Brasil, 1998).

A norma ABNT NBR 10.004/ 2004 definiu os critérios para a classificação dos resíduos sólidos. De acordo com essa norma, os resíduos são classificados em duas categorias: Classe I, que abrange os resíduos perigosos, e Classe II, referente aos resíduos não perigosos. Esta última é subdividida em Classe II A, destinada aos resíduos não inertes, e Classe II B, que corresponde aos resíduos inertes. O lodo de ETA, geralmente, é classificado como Classe II A – Não inerte, mas a sua classificação depende da sua composição química, física e biológica (ABNT, 2004b).

Diante do cenário de descarte de lodo *in natura* nos corpos hídricos, a Resolução CONAMA n° 237, de 1997, estabeleceu a obrigatoriedade do Licenciamento Ambiental para a implantação de novas estações de tratamento de água, visando assegurar que suas operações estejam em conformidade com os princípios da proteção ambiental e da gestão responsável dos recursos hídricos (Brasil, 1997b).

A Lei n° 11445, de 2007, estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil, atribuindo aos municípios a titularidade desses serviços. Essa legislação definiu o saneamento básico como um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais voltados para o abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Essas atividades devem ser executadas assegurando a promoção da saúde pública e o equilíbrio do meio ambiente (Brasil, 2007).

A Lei 12305 de 2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que foi um marco para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, abordando aspectos importantes como a definição de resíduo e rejeito, sendo o rejeito os resíduos que tiveram esgotadas as suas possibilidades para tratamento e recuperação, portanto devem possuir disposição final ambientalmente adequada, ou seja, dispostos em aterros sanitários (Brasil, 2010b).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em 2012 a versão traduzida da norma internacional ISO 24512:2007 de gestão dos sistemas de água. O que levou à criação da “NBR ISO 24512:2012 que dispõe de atividades relacionadas aos serviços de água potável e de esgoto – Diretrizes para a gestão dos prestadores de serviços de água e para a avaliação dos serviços de água potável” (ABNT, 2012).

A Lei n° 14.026, sancionada em julho de 2020, atualizou o marco legal do saneamento básico. Este instrumento deu espaço para a entrada da iniciativa privada no setor de saneamento através dos contratos de concessão, estabeleceu como prazo para universalização dos serviços de saneamento o final de 2033 e determinou a obrigatoriedade dos planos de saneamento básico (Brasil, 2010b).

Por último, a norma da ABNT NBR 10004 passou por uma revisão em 2024 trazendo mais rigor para os geradores quanto ao manejo desse resíduo. Uma das principais novidades é a obrigatoriedade da emissão de laudo de classificação de resíduo (LCR) emitido por responsável técnico habilitado, aumentando a responsabilidade legal e técnica do gerador e reforçando a necessidade de conhecer bem a origem, a composição e as características do lodo.

## 2.5. INDICADORES UTILIZADOS PARA RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA

O uso de indicadores está geralmente associado à quantificação, qualificação e simplificação das informações disponíveis. Os indicadores auxiliam a interpretação de um grande volume de informações, possibilitando uma compreensão mais objetiva dos dados, além de exercer um papel fundamental na tomada de decisões, criação de metas e objetivos, sendo ferramentas essenciais para os gestores (Farias, 2020).

Santos (2004) enfatiza que uma seleção criteriosa de indicadores contribui para a redução dos números de parâmetros e variáveis a serem monitorados no ambiente, otimizando processos. Desta forma, os indicadores tornam-se ferramentas essenciais no planejamento estratégico, uma vez que a tomada de decisões requer agilidade e eficiência na destinação dos recursos disponíveis. Portanto, é imprescindível que o processo de gestão adotado considere o sistema de tratamento de água de forma integrada, abrangendo desde a entrega do produto (água potável) até a geração, o manejo e a destinação final dos resíduos resultantes deste processo.

O gerenciamento do lodo de estações de tratamento de água (LETA) representa um grande desafio para os gestores. Isso se deve a diversos fatores, como a adequação à legislação, à variabilidade das características do resíduo gerado, o emprego de tecnologias apropriadas para o tratamento deste, os custos envolvidos e a limitação de espaço físico nas estações de tratamento de água, haja vista que muitas destas encontram-se em áreas altamente adensadas. Desta forma, é fundamental adotar uma abordagem sistêmica na

gestão desses resíduos, levando em conta aspectos ambientais, sociais, culturais, econômicos, tecnológicos e de saúde pública (Urban *et al.*, 2019).

Diante do exposto, surge a série de normas ISO 24510, formada por três normas que adotam conceitos direcionados às atividades de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Dentre essas normas está a NBR ISO 24512, que nos apresenta diretrizes para a gestão dos prestadores de serviços e avaliação dos serviços de abastecimento de água.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a versão, traduzida da norma internacional ISO 24512:2007 de gestão dos sistemas de água. O que levou à criação da “NBR ISO 24512:2012: Atividades Relacionadas aos Serviços de Água Potável e de Esgoto – Diretrizes para a Gestão dos Prestadores de Serviços de Água e para a Avaliação dos Serviços de Água Potável” (ABNT, 2012).

O uso de indicadores constitui uma ferramenta essencial para a gestão eficiente dos serviços de saneamento, especialmente no setor de abastecimento de água. Segundo a NBR ISO 24512, os indicadores são instrumentos fundamentais para a avaliação desses serviços, devendo ser definidos a partir de objetivos claros e critérios de avaliação bem estabelecidos. Para isso, é necessário utilizar variáveis que tenham níveis de confiabilidade e precisão adequados, que forneçam o suporte necessário para aplicação e indicadores (Vale e Achon, 2016).

Um fator decisivo para a melhoria do desempenho ambiental relacionado ao manejo do lodo de estações de tratamento de água (LETA) e da água de lavagem dos filtros (ALAF) é a adoção de práticas de gestão que estimulem os responsáveis a implementar metodologias voltadas para uma maior eficiência dos processos. Tais práticas contribuem para a redução dos impactos ambientais, sociais e econômicos, colaborando para a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água (Silva, 2021).

Silva (2021) enfatiza que as concessionárias de água produzem e manipulam uma quantidade gigantesca de dados, que na maioria das vezes são utilizados apenas com o foco no produto (água tratada), desintegrando as etapas do processo como um todo. Nesse processo de fragmentação, perde-se a visão sistêmica que é fundamental para englobar o processo em sua totalidade,

prejudicando a busca pela melhoria contínua e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento.

Portugal se destaca como referência na aplicação de indicadores para a avaliação de desempenho em Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Um dos principais destaques é o trabalho desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), criado em 1946, que, por meio de seu Departamento de Hidráulica e Ambiente, realiza estudos abrangendo todo o ciclo da água. As pesquisas conduzidas pelo LNEC têm como base cinco pilares estratégicos: gestão de risco e segurança, infraestrutura, ambiente e sistemas aquáticos, água e cidade, e sistemas de informação, contribuindo significativamente para o avanço da gestão e sustentabilidade dos serviços de saneamento (LNEC, 2020).

Dentre os projetos desenvolvidos pelos pesquisadores do LNEC, destaca-se o estudo da elaboração de 80 indicadores de desempenho para estações de tratamento de água, tendo como referência os parâmetros estabelecidos nas normas ISO 24510/2007 e 24512/2007, sendo divididos em sete grupos: qualidade da água tratada, eficiência e fiabilidade da ETA, utilização de água, energia e materiais, gestão de subprodutos, segurança, recursos humanos e recursos econômicos - financeiros (Silva, 2021).

Os indicadores de desempenho relacionados aos resíduos do processo de tratamento de água são apresentados na Tabela 4. Esses indicadores avaliam a eficiência e o impacto ambiental do processo, oferecendo parâmetros que auxiliam na gestão e no controle dos resíduos gerados durante o tratamento da água.

Tabela 596 - Indicadores relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água

<b>Tipo</b>	<b>Descrição do indicador</b>
<b>Produção de Resíduos</b>	BP1 – Quantidade de lodo gerado [kg/(m <sup>3</sup> x UT)] = Quantidade de lodo gerado / (volume de água na entrada da ETA x turbidez da água bruta)
	BP2 – Qualidade do lodo [% m/m] = Peso seco do lodo produzido
	BP4 – Disposição final do lodo [%] = (Quantidade de lodo submetido a valorização / quantidade de lodo gerado) x 100
<b>Gerenciamento de Resíduos</b>	BP5 – Destinação dos resíduos que podem ser reaproveitados [%] = (quantidade de resíduos que é reaproveitado / quantidade de resíduos que podem ser reaproveitados) x 100
	BP7 – Águas residuais do processo sem tratamento que é descartada no meio ambiente [m <sup>3</sup> águas residuais/m <sup>3</sup> água tratada] = volume de águas residuais do processo descartada no meio ambiente / volume de água tratada

Fonte: Silva, 2021.

Achon e Cordeiro (2013) desenvolveram um conjunto de indicadores voltados à gestão dos resíduos gerados no tratamento de água (LETA e ALAF), a partir de uma análise detalhada da legislação e de visitas técnicas a várias ETAs. Ao todo, foram propostos 43 indicadores, organizados em duas categorias: 21 indicadores de avaliação geral que estão apresentados no Quadro 3 e 22 indicadores de avaliação individual que estão exibidos no Quadro 4.

Os indicadores gerais permitem uma análise ampla das ETAs em relação ao contexto de uma bacia hidrográfica. Já os indicadores individuais avaliam de forma mais específica a gestão de resíduos em cada estação e tratamento de água.

Quadro 3 - Indicadores gerais relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água

<b>Código</b>	<b>Indicador Geral - Resíduos de ETA (IgA)</b>	<b>Unidade</b>
IgA1	Produção per capita de água tratada na ETA	Litros/hab.dia
IgA2	Porcentagem de contribuição das ETA em termos volumétricos de água tratada	%
IgA3	Porcentagem das ETA com administração pública ou privada	%
IgA4	Porcentagem das ETA por tipo de manancial	%
IgA5	Porcentagem das ETA por tipo de coagulante utilizado	%
IgA6	Porcentagem das ETA que possuem tecnologia de tratamento de ciclo	%
IgA7	Porcentagem das ETA que possuem decantador convencional	%
IgA8	Porcentagem das ETA que possuem decantador com fundo plano	%
IgA9	Porcentagem das ETA convencionais de ciclo completo que removem o lodo	%
IgA10	Porcentagem das ETA que removem o lodo de forma intermitente	%

<b>Código</b>	<b>Indicador Geral - Resíduos de ETA (IgA)</b>	<b>Unidade</b>
IgA11	Porcentagem das ETA que medem/estimam a quantidade de lodo	%
IgA12	Porcentagem das ETA que caracterizam o lodo gerado	%
IgA13	Porcentagem das ETA que lançam o lodo bruto em corpos d'água	%
IgA14	Porcentagem das ETA que possuem sistema natural de desaguamento	%
IgA15	Porcentagem das ETA que reutilizam/reciclam lodo desaguado	%
IgA16	Porcentagem das ETA que removem o resíduo dos filtros (ALAF) com uso específico	%
IgA17	Porcentagem das ETA que medem/estimam a quantidade de ALAF	%
IgA18	Porcentagem das ETA que caracterizam o ALAF	%
IgA19	Porcentagem das ETA que lançam o ALAF em corpos d'água	%
IgA20	Porcentagem das ETA que reutilizam/reciclam o ALAF	%
IgA21	Porcentagem de perdas de água na ETA	%

Fonte: Achon e Cordeiro, 2013. Adaptado pela autora, 2025.

Quadro 4 - Indicadores individuais relacionados aos resíduos de estações de tratamento de água

<b>Código</b>	<b>Indicador Geral - Resíduos de ETA (IgA)</b>	<b>Unidade</b>
liA1	Volume de lodo gerado por metro cúbico de água tratada	L/m <sup>3</sup>
liA2	Porcentagem de lodo gerado contínuo do volume de água tratada	%
liA3	Massa de lodo gerado por metro cúbico de água tratada	Kg/m <sup>3</sup>
liA4	Nível de caracterização do lodo gerado	Un (0 a 3)
liA5	Porcentagem de sólidos no lodo bruto	%
liA6	Nível de desidratação do lodo bruto	Un (0 a 3)
liA7	Nível de desaguamento do lodo bruto	Un (0 a 3)
liA8	Porcentagem de lodo gerado que é reutilizado ou reciclado	%
liA9	Volume de ALAF gerado por metro cúbico de água tratada	L/m <sup>3</sup>
liA10	Porcentagem de ALAF gerado contínuo do volume de água tratada	%
liA11	Massa de ALAF gerado por metro cúbico de água tratada	Kg/m <sup>3</sup>
liA12	Nível de caracterização da ALAF	Un (0 a 3)
liA13	Porcentagem de sólidos na ALAF	%
liA14	Nível de destinação da ALAF	Un (0 a 3)
<b>Código</b>	<b>Indicador Geral - Resíduos de ETA (IgA)</b>	<b>Unidade</b>
liA15	Porcentagem de ALAF que é reutilizada ou reciclada	%
liA16	Custo de implantação da UTL* por Kg de resíduo afluente	R\$/Kg
liA17	Porcentagem de sólidos no resíduo efluente a UTL*	%
liA18	Consumo de produtos químicos na UTL* por Kg de resíduo afluente	G/kg
liA19	Consumo de energia elétrica na UTL* por Kg de resíduo afluente	KWh/kg
liA20	Custo operacional da UTL* por KG de resíduo afluente	R\$/KG
liA21	Nível de destinação do resíduo sólido efluente a UTL*	Un (0 a 3)
liA22	Nível de destinação do resíduo líquido efluente a UTL*	Un (0 a 3)

Fonte: Achon e Cordeiro, 2013. Adaptado pela autora, 2025.

Os indicadores foram aplicados em 21 estações de tratamento de água com diferentes vazões anuais, por meio de formulários com a finalidade de diagnosticar a gestão de resíduos gerados no tratamento de água. Os resultados mostraram falta de dados confiáveis, já que cerca de 33% das ETAs visitadas apenas mediam ou estimavam a quantidade de lodo gerado, evidenciando

grandes desafios para os gestores assegurarem a conformidade com as legislações vigentes (Silva, 2021).

Vale e Achon (2016) realizaram um estudo que tinha como objetivo analisar a aplicabilidade de um conjunto de indicadores propostos, baseados a partir da literatura, para apoiar a gestão dos resíduos gerados durante o tratamento de água, especificamente LETA e ALAF. A coleta dos dados foi realizada por meio da aplicação de formulário, o qual foi aplicado em uma estação de tratamento de água localizada no Estado de São Paulo. O Quadro 5 apresenta detalhadamente os indicadores propostos para o monitoramento e controle dos resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETAs).

Quadro 5 - Indicadores propostos para gestão dos resíduos gerados em ETA

<b>Código</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidade</b>
linA1 (6)	Volume de lodo gerado por metro cúbico de água tratada	L/m <sup>3</sup>
linA2 (6)	Porcentagem de lodo gerado em função do volume de água tratada	%
linA3 (6)	Massa de lodo gerado por metro cúbico de água tratada	kg/m <sup>3</sup>
linA4 (6)	Nível de caracterização do lodo gerado (1)	un (0 a 3)
linA5 (6)	Porcentagem de sólidos no lodo bruto	%
linA6 (6)	Nível de destinação do lodo bruto (2)	un (0 a 3)
linA7 (6)	Nível de desaguamento do lodo bruto (3)	un (0 a 3)
linA8 (6)	Porcentagem do lodo gerado que é reutilizado ou reciclado	%
linA9 (6)	Volume de ALAF gerado por metro cúbico de água tratada	L/m <sup>3</sup>
linA10 (6)	Porcentagem de ALAF gerada em função do volume de água tratada	%
linA11 (6)	Massa de ALAF gerada por metro cúbico de água tratada	kg/m <sup>3</sup>
linA12 (6)	Nível de caracterização da ALAF (4)	un (0 a 3)
linA13 (6)	Porcentagem de sólidos na ALAF	%
<b>Código</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidade</b>
linA14 (6)	Nível de destinação da ALAF (5)	un (0 a 3)
linA15(6)	Porcentagem da ALAF que é reutilizada ou reciclada	%
wOp52 (7)	Análises de lodo	n.º/ano
wOp12 (6)	Calibração de medidores de vazão do sistema	n.º/ano

<sup>(1)</sup> 0 = não se aplica (não faz nenhuma caracterização do lodo); 1= apenas quantifica o lodo (mede/estima o volume de lodo gerado); 2 = quantifica e faz análises de qualidade, porém não classifica o lodo segundo a NBR 10.004/2004; 3 = quantifica e classifica o lodo segundo a NBR 10.004/2004.

<sup>(2)</sup> 0 = lança o lodo em corpo d'água; 1 = armazena o lodo bruto/tanque adensamento; 2 = encaminha o lodo para ETE; 3 = destina o lodo para tratamento/desaguamento.

<sup>(3)</sup> 0 = não deságua o lodo; 1 = adensamento do lodo; 2 = desaguamento em sistemas ou mecânicos; 3 = secagem em sistemas térmicos (naturais ou mecânicos).

<sup>(4)</sup> 0 = não faz nenhuma caracterização da ALAF; 1= apenas quantifica a ALAF (mede/estima o volume gerado); 2 = quantifica e faz análises de qualidade, porém não verifica o padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela Resolução do CONAMA Nº 430/2011 ; 3 = quantifica e verifica o padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela Resolução do CONAMA Nº 430/2011.

<sup>(5)</sup> 0 = lança a ALAF em corpo d'água ou na rede pluvial; 1 = lança a ALAF na rede de esgoto; 2 = reutiliza direto a ALAF (após tanque de armazenamento/acúmulo ou não) retornando-a para entrada da ETA; 3 = destina a ALAF para adensamento e/ou desaguamento e depois para reutilização (reúso ou retorno para entrada da ETA).

Fonte: Vale e Achon, 2016. Adaptado pela autora, 2025.

A análise dos resultados revela a ausência ou inexistência de dados, decorrentes da falta de mensuração dos dados ou pela resistência dos gestores em relação à ausência de transparência das informações. Esses fatores podem comprometer a aplicação dos indicadores e, conseqüentemente, a eficácia da gestão dos resíduos. Portanto, é imprescindível a conscientização dos gestores acerca dos benefícios do monitoramento da geração de resíduos em ETAs e da utilização de indicadores para melhoria e aprimoramento da gestão desses resíduos (Vale e Achon, 2016).

Desta forma, a gestão dos resíduos oriundos do tratamento de água é fundamental para o aprimoramento e planejamento do processo como um todo. Nesse sentido, a gestão do LETA e da ALAF busca também otimizar os processos, melhorando a qualidade da água tratada e impactando diretamente a produção de resíduos (Silva, 2021).

## 2.6. IMPACTO DA QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA ANÁLISE A PARTIR DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)

A Organização das Nações Unidas (ONU), em 2015, fez uma publicação muito importante, a Agenda 2030. Este documento propôs alguns objetivos do desenvolvimento sustentável e metas a serem cumpridas até o ano de 2030. Dentre estes objetivos está o ODS 6, que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos (Dos Santos, 2021; ONU, 2016).

A água é um bem essencial para a vida no planeta, para a saúde humana, o equilíbrio ambiental e o desenvolvimento socioeconômico. Sendo assim, a qualidade da água precisa obedecer a padrões específicos para assegurar seu uso em diversas atividades e manutenção do meio de vida aquático. Desta forma, é de fundamental importância a gestão adequada dos recursos hídricos e uma fiscalização rigorosa para evitar danos ambientais e problemas de saúde pública (Terra *et al.*, 2024).

A ação antrópica, o uso e ocupação desordenada do solo, a devastação do meio ambiente juntamente com a emissão de poluentes, têm impactado severamente os corpos hídricos. Essa degradação, na maioria das vezes, ocorre

de forma gradual, o que torna essencial o uso de instrumentos que possam indicar o nível dessa deterioração ao longo do tempo. Essa avaliação dos corpos hídricos geralmente é feita por meio da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos (Menezes *et al.*, 2010).

Contudo, relacionar múltiplos parâmetros representa uma tarefa complexa. Com o intuito de simplificar a interpretação e correlação de todos esses resultados, optou-se por sintetizar esses parâmetros em um único valor numérico e relacioná-lo com a qualidade da água. Essa abordagem tem como finalidade tornar a informação mais clara, objetiva e compreensível (Pereira *et al.*, 2013).

No Brasil, cinco índices são atualmente empregados para o monitoramento da qualidade da água: o Índice de Qualidade das Águas (IQA), Índice de Qualidade da Água Bruta para fins de Abastecimento Público (IAP), Índice de Estado Trófico (IET), Índice de Balneabilidade (IB) e o Índice de Qualidade de Água para a Proteção da Vida Aquática (IVA).

O diagnóstico dos mananciais por meio do índice de qualidade das águas (IQA) é uma maneira de avaliar os impactos da atividade antrópica, que provocam alterações diretas nos mananciais. O IQA é composto por nove parâmetros considerados essenciais para a caracterização da qualidade da água: pH, Turbidez, Fósforo, Nitrogênio, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Sólidos Totais, Temperatura e Coliformes Termotolerantes. A maior parte desses parâmetros busca avaliar a relação entre a contaminação do corpo hídrico e o lançamento de esgoto doméstico (Landa *et al.*, 2025).

A *National Sanitation Foundation (NSF)* foi responsável pela criação do Índice de Qualidade das Águas (IQA). Posteriormente, este índice foi adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para atender aos padrões brasileiros. Seu objetivo é avaliar a qualidade da água bruta destinada ao abastecimento humano. Os valores numéricos deste índice correlacionam a qualidade da água do manancial numa escala qualitativa que varia de péssima a ótima (Pereira *et al.*, 2013).

A CETESB adaptou o índice de qualidade das águas, substituindo o nitrogênio, que constava na fórmula original, pelo nitrogênio total, e utiliza este parâmetro desde 1975. No decorrer dos anos, os demais estados brasileiros

adotaram o IQA, que atualmente é o principal índice de qualidade da água utilizado no país. É importante enfatizar que as faixas de classificação do IQA podem variar entre os estados brasileiros. (Pereira *et al.*, 2013). Abaixo, a Figura 4 apresenta as faixas de classificação conforme a variação do IQA adotado pela CETESB.

Figura 2174 - Faixas de classificação IQA- CETESB.

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	$79 < \text{IQA} \leq 100$
BOA	$51 < \text{IQA} \leq 79$
REGULAR	$36 < \text{IQA} \leq 51$
RUIM	$19 < \text{IQA} \leq 36$
PÉSSIMA	$\text{IQA} \leq 19$

Fonte: São Paulo, 2023.

O IQA é calculado por meio do produto ponderado das variáveis que o compõem. Abaixo segue a fórmula utilizada pela CETESB (SÃO PAULO, 2023). O valor de “n” corresponde ao número de parâmetros que compõem o índice, sendo sempre igual a 9, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 2670 - Cálculo de IQA

$$\text{IQA} = \prod_{i=0}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Onde:

IQA - Índice de Qualidade da Água (varia de 0 a 100);

$q_i$  - qualidade do parâmetro  $i$ -ésimo, obtido através da curva média de cada parâmetro;

$w_i$  - é o peso atribuído ao  $i$ -ésimo parâmetro;

$n$  - número de parâmetros ( $n = 9$ )

Fonte: São Paulo, 2023.

Segundo Oliveira (2017), a qualidade da água bruta de um manancial tem impacto direto na quantidade de lodo produzido nas ETAs. As propriedades da água bruta não somente moldam as características físico-químicas desse resíduo, mas também determinam o potencial poluidor deste resíduo nos corpos d'água em caso de descarte inadequado.

(Moreira *et al.*, 2009) citado por (Dos Santos *et al.*, 2021) enfatiza que as águas brutas que possuem menores valores de cor e turbidez geram menos resíduos. Ambos os autores ressaltam que o lodo formado é composto por sedimentos carregados pela água bruta captada quanto por cátions adicionados no processo de coagulação.

Fiore *et al.* (2020) defendem que, para reduzir o volume de lodo produzido nas estações de tratamento de água, é necessário: uma água captada de boa qualidade (menos poluída), o aprimoramento de tecnologias e a utilização de produtos químicos mais eficientes e que tenham um custo viável para a operação.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) destaca que o surgimento de índices e indicadores ambientais está intimamente ligado à preocupação da sociedade e de órgãos públicos com as questões ambientais. Tendo em vista um grande volume de informações com níveis de complexidade cada vez maiores, os índices se consolidaram como elementos essenciais para a decisão em políticas públicas, acompanhamento de seus impactos e estabelecimento de metas. (São Paulo, 2023).

## 2.7. ANÁLISE PREDITIVA E CENÁRIOS FUTUROS

Análise preditiva é um campo da ciência que utiliza dados (históricos e/ou atuais) combinados com técnicas estatísticas, algoritmos e inteligência artificial com o objetivo de identificar padrões e realizar previsões futuras. Esse é um grande diferencial, pois a análise preditiva vai além de entender “o que aconteceu” (análise descritiva) ou diagnosticar “o por que aconteceu” (análise diagnóstica). Sua finalidade é: identificar padrões que possibilitem a criação de cenários futuros.

Conforme Evans e Lindner (2012), a análise preditiva é a parte da ciência de dados que, por meio da investigação de séries históricas, busca identificar padrões e relações intrínsecas. Essa metodologia permite identificar ocorrências e prever tendências futuras. Para isso, é necessária a combinação de ferramentas sofisticadas como *Machine Learning* e métodos estatísticos para revelar padrões e conexões que não seriam facilmente percebidos por outros métodos. Atualmente, é considerada uma das áreas mais influentes e

promissoras, permitindo que empresas e organizações tomem decisões mais seguras, baseadas em dados, e elaborem cenários futuros.

A análise preditiva situa-se dentro do campo mais amplo da ciência, o *Data Science*, que possibilita a integração da análise de dados de forma quantitativa e qualitativa. Waller e Fawcett (2013) afirmam que, para isso, é necessário o emprego de modelos estatísticos e métodos empíricos para realizar previsões futuras.

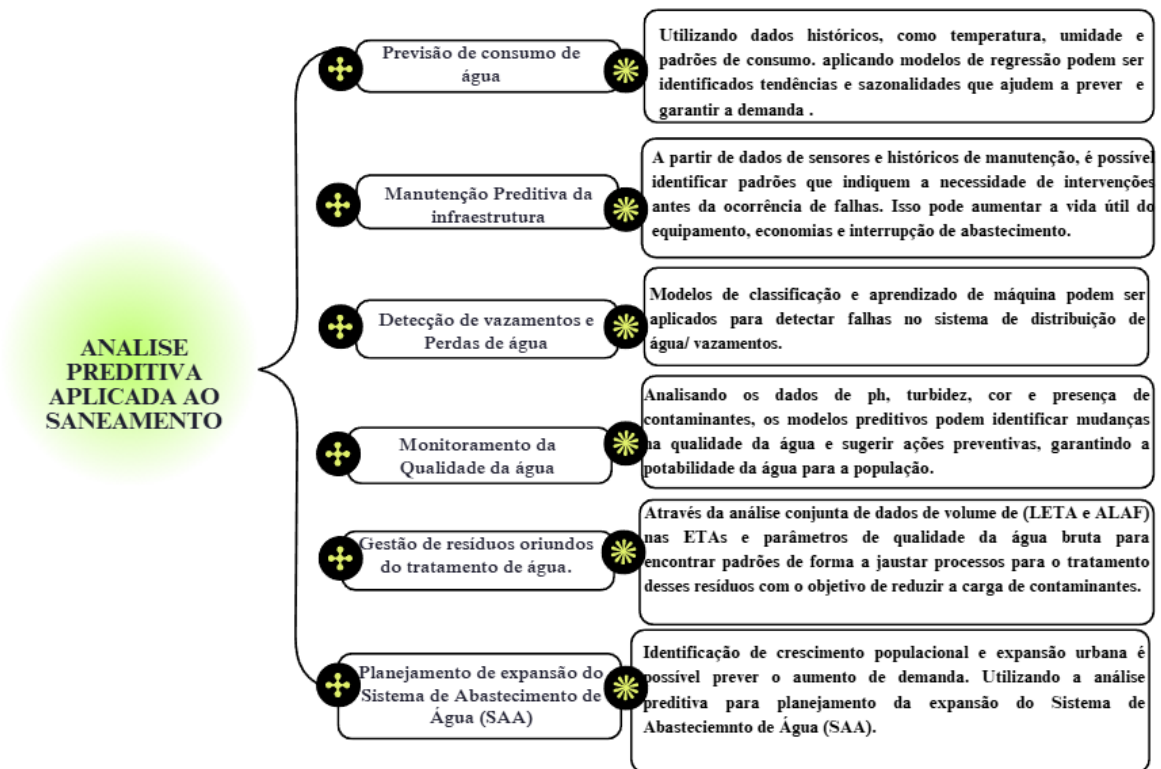
Segundo Gandomi e Haiden (2015), a análise preditiva tem dois objetivos principais: encontrar padrões por meio da análise de bases de dados e definir relações entre essas variáveis. A compilação destas informações é feita através do uso de ferramentas para análise de dados e modelos estatísticos existentes ou que possam ser desenvolvidos. Dentre as ferramentas disponíveis, as mais utilizadas estão: os modelos de regressão, *Data Mining* (buscando padrões) e médias móveis (buscando dados históricos). Quanto à metodologia, as técnicas são divididas em dois grandes grupos: técnicas de Regressão e *Machine Learning* (como uso de redes neurais).

Existem dois principais tipos de modelos de análise preditiva que são: modelo de classificação e de regressão. Nos modelos de classificação, o objetivo é agrupar os dados semelhantes, atribuindo para cada dado um grupo específico. Já os modelos de regressão são usados com a finalidade de prever valores contínuos, realizando estimativas de variáveis numéricas.

No atual cenário global, a análise prospectiva surge como uma ferramenta essencial para todos os ramos, pois, por meio de análises probabilísticas, é possível minimizar danos ou incertezas na tomada de decisão. Nesse contexto, o planejamento estratégico é cada vez mais empregado por empresas e tem se tornado um grande desafio mundial, pois decisões tomadas em um local do planeta podem trazer impactos globais. (Betarello *et al.*, 2025).

No setor de saneamento, a análise preditiva pode ser aplicada de várias formas, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 2958 - Formas de aplicação da análise preditiva no setor de saneamento



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Em 2022, Welton A. e Júnior Neto realizaram um estudo para avaliar as mudanças introduzidas pela Lei nº 14.026/2020, que estabeleceu um novo marco legal para o setor de saneamento até 2033, e desenvolver cenários futuros para este setor. A metodologia empregada na pesquisa foi a Delphi (entrevista com gestores e profissionais da área de saneamento) e, através da aplicação do método Grumbach e do levantamento de forças motrizes influentes neste setor, foram elaborados três cenários distintos: Otimista, Realista e Pessimista.

Os dados coletados apresentados na Tabela 5 mostram os 20 principais eventos com maior probabilidade de impactar a área de saneamento nos próximos anos, de acordo com a percepção dos entrevistados. Além da probabilidade de ocorrência dos eventos, foi avaliado também o grau de favorabilidade da ocorrência de cada um para o setor.

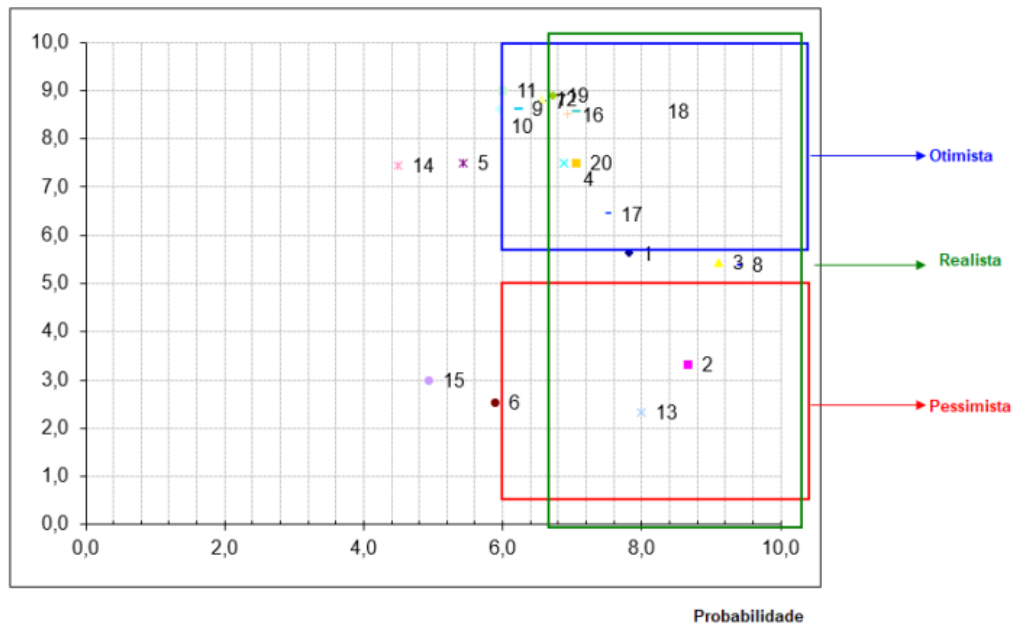
Tabela 892 - Lista de eventos, probabilidade e favorabilidade para o setor de saneamento

Item	Eventos	Probabilidade	Favorabilidade
1	Privatização dos serviços de saneamento	7,81	5,63
2	Baixo interesse da iniciativa privada em pequenas localidades não lucrativas	8,67	3,33
3	Maior interesse por arte das iniciativas privadas nos grandes centros	9,11	5,44
4	Regulação do setor - parâmetros mais definidos	6,89	7,50
5	Responsabilidade social - tarifas justas	5,44	7,50
6	Redução de investimentos	5,89	2,53
7	Aumento de investimentos	6,56	8,78
8	Aumento de tarifa	8,39	5,39
9	Melhoria da gestão no setor	6,22	8,61
10	Preservação ambiental- preservação e reflorestamento	5,94	8,61
11	Universalização dos serviços	6,00	9,00
12	Educação ambiental e conscientização da população.	6,56	8,83
13	Terceirização dos serviços (pior qualidade)	8,00	2,33
14	Terceirização dos serviços (melhor qualidade)	4,50	7,44
15	Escassez Hídrica- alterações climáticas	7,94	3,00
16	Redução índices de perdas	6,94	8,50
17	Mudanças na legislação (Novo Marco Legal)- Alterações	7,50	6,44
18	Modernização dos sistemas - novas tecnologias	7,06	8,56
19	Melhores índices de tratamento de esgotos (redução de lançamento in natura)	6,72	8,89
20	Consórcios municipais - PPP Pracerias público Privadas - Políticas Públicas	7,06	7,50

Fonte: Adaptado pelo autor (2025).

De acordo com a tabela apresentada acima, os autores elaboraram três cenários (otimista, realista e pessimista), de forma a visualizar a posição de cada evento em relação a cada cenário, conforme apresentado no gráfico Figura 7.

Figura 3358 - Cenários propostos (otimista, realista e pessimista).



Fonte: Welton A. e Junior Neto, 2022.

Segundo Welton A. e Júnior Neto (2022), apesar de a maioria dos eventos estar dentro do cenário otimista, os resultados obtidos evidenciam uma preocupação dos profissionais da área quanto ao futuro. Provavelmente devido às significativas mudanças trazidas pela legislação, que acarretarão grandes transformações para o setor. Desenhando um novo panorama, no qual a abertura deste setor para concessão da iniciativa privada não apenas impulsiona a modernização das estatais, mas também altera a forma de atuação dessas empresas no mercado, dada a concorrência do capital privado.

Em um estudo conduzido por Costa *et al.* (2013), com o objetivo de analisar a expansão urbana da cidade de São Carlos - SP com o foco no crescimento populacional e na superfície impermeabilizada no decorrer de um período de 44 anos. A pesquisa tinha como finalidade principal interpretar os impactos do crescimento urbano quanto ao uso e ocupação do solo, à sustentabilidade das cidades e aos recursos hídricos.

Para o mapeamento da mancha urbana, foram utilizadas imagens de satélite e fotografias aéreas de diferentes períodos entre 1962 e 2006. Essas imagens foram georreferenciadas com softwares de geoprocessamento, baseado na metodologia proposta por Jansen (2009). Para previsão do

crescimento populacional, os dados foram coletados junto à Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados- SP (SEADE). Os dados das redes de drenagem, malha viária e bacias hidrográficas foram obtidos através das cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Para elaboração de cenários futuros, a metodologia utilizada foi a de López (2001) e Jat *et al.* (2008), que se baseia em modelos matemáticos.

Os resultados indicaram um aumento populacional e de área impermeabilizada de aproximadamente 77% e 94%, respectivamente, até 2050. Analisando a projeção para o ano de 2050, apresentada na Tabela 6, percebe-se um pequeno aumento na população, porém a densidade populacional quase que se mantém, o que evidencia uma expansão urbana de forma dispersa e fragmentada, resultando na ocupação de novas áreas, expansão do perímetro urbano e conseqüentemente no aumento dos impactos ambientais e potencializando a pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Tabela 1388 - Cenários de crescimento populacional e área impermeabilizada até 2050 em São Carlos

	Ano	Área (km <sup>2</sup> )	Incremento na SI* (%)	População (habitante)	Incremento na população (%)	Densidade (Hab/km <sup>2</sup> )
Dados	1962	18,04	-	66.312	-	3.675,8
	1972	23,07	27,9	91.214	37,6	3.953,8
	1986	38,45	66,7	139.162	52,6	3.619,3
	1996	54,20	41,0	177.222	27,3	3.269,8
	2006	73,95	36,4	216.266	22,0	2.924,5
Cenários	2010	82,47	11,5	230.717	6,7	2.797,5
	2020	97,64	18,4	268.634	16,4	2.751,3
	2030	112,81	15,5	306.551	14,1	2.717,5
	2040	127,97	13,4	344.468	12,4	2.691,7
	2050	143,14	11,9	382.385	11,0	2.671,4

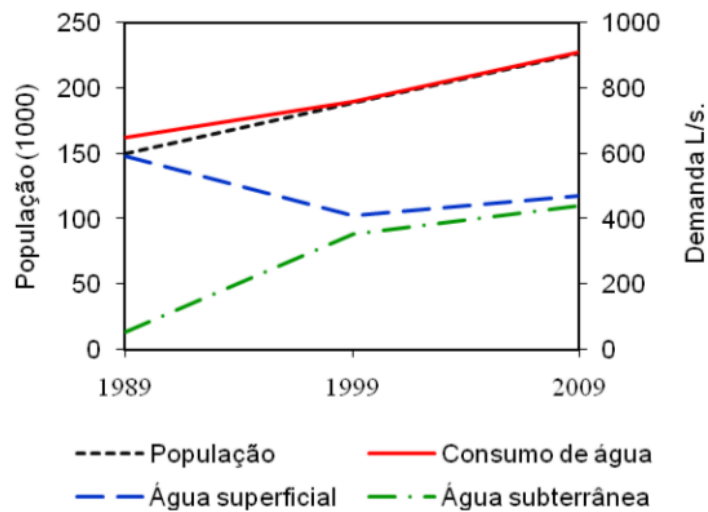
Legenda: \*Superfície impermeabilizada ou mancha urbana.

Fonte: Costa *et al.*, 2013.

No que tange à análise feita para a exploração de recursos hídricos em relação às taxas de crescimento populacional e demanda hídrica, os resultados revelam um aumento populacional de aproximadamente 51% (1989 e 2009),

acompanhado por um crescimento em torno de 40% na demanda hídrica, provocando um aumento no consumo de 650l/s em 1989 para 911,4l/s em 2009. Ao analisar o gráfico da Figura 8, percebe-se uma redução de 20% na exploração de fontes superficiais e um aumento significativo na exploração de fontes subterrâneas. O que pode evidenciar uma deterioração dos mananciais superficiais, causando uma migração expressiva na exploração das fontes subterrâneas, provocando um grande estresse hídrico no sistema desta região.

Figura 4014 - Análise da exploração dos recursos hídricos



Fonte: Costa *et al.*, 2013.

No Brasil, Araújo *et al.* (2009) realizaram uma pesquisa sobre a gestão dos resíduos sólidos na cidade de Curitiba, cujo objetivo principal era utilizar a técnica de cenários futuros como ferramenta de planejamento de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU). Inicialmente, se realizou um diagnóstico para caracterizar o cenário atual de Curitiba. Baseado nesse cenário realista, foram elaborados cenários alternativos para produção de resíduos da cidade, com foco em mudança de hábitos da população e emprego de políticas de gestão destes, considerando o período de (2008-2020). A elaboração dos cenários considerou as seguintes variáveis: geração de RSU, população e consumo per capita (PIB).

Para a caracterização do cenário atual, foram coletadas as informações junto aos gestores públicos, por meio de entrevista baseada em formulários. Para a caracterização dos RSU, foi utilizada a metodologia proposta por Tavares (2007), de caracterização gravimétrica, baseada em dados históricos de geração

e composição do resíduo. Os dados históricos foram obtidos através do Departamento de Limpeza Urbana de Curitiba. Para a estimativa populacional, foram analisados dados históricos do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC), que utiliza dados de censos demográficos do IBGE, dentre outros (Araújo de Melo *et al.*, 2009).

A estimativa do valor do PIB foi feita baseando-se em definições constantes na literatura e, para ajustar esses valores de forma que levassem em consideração a inflação e o aumento do custo de vida da população, utilizou-se um índice de custo de vida que considera essas variáveis, que foi o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Desta forma, o ajuste foi realizado multiplicando-se o índice cumulativo a cada ano pelo valor do PIB do ano equivalente (Araújo de Melo *et al.*, 2009).

Para a construção dos cenários, a variável dependente (geração RSU) foi correlacionada linearmente com os dados de população e PIB através do método de Regressão Múltipla. Para referenciar a análise dos resultados, foram utilizados indicadores disponíveis na literatura, como uma maneira de mensurar impactos de natureza econômica ou ambiental. A Tabela 7 apresenta os indicadores utilizados como referência da literatura (Araújo de Melo *et al.*, 2009).

Tabela 1452 - Indicadores presentes na literatura e utilizados para estimativa dos impactos de geração de RSU na cidade de Curitiba

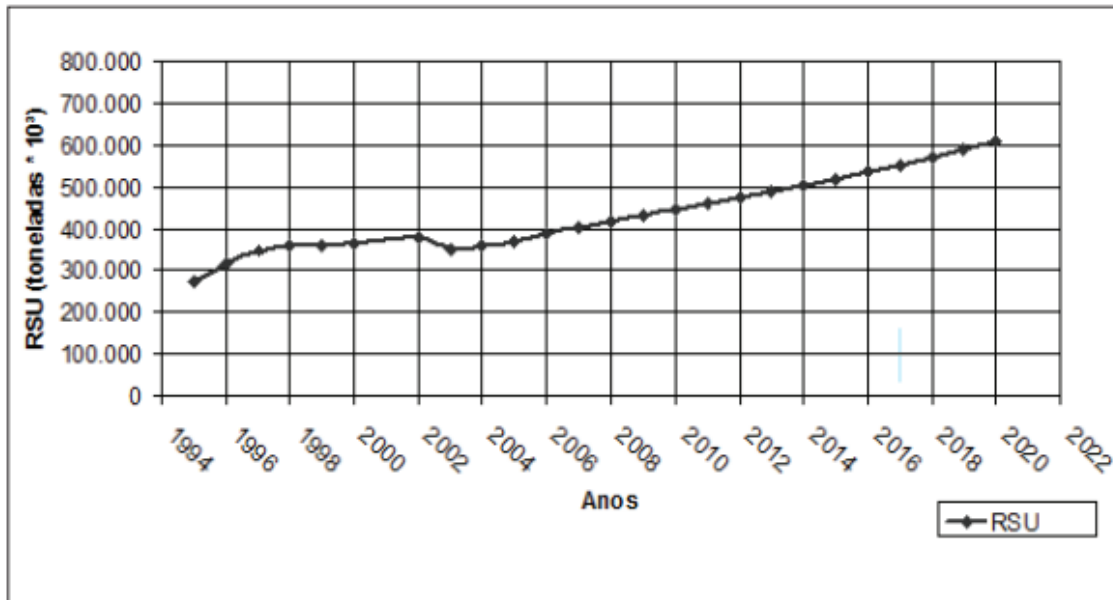
<b>Indicadores e fontes</b>	<b>Valor</b>
Densidade dos RSU (Monteiro, 2006; USEPA, 2005)	600 kg.m <sup>3</sup>
Densidade dos Recicláveis (Farias, 2020)	300 kg.m <sup>3</sup>
Densidade dos Resíduos Orgânicos (Quaresma, 1998)	800 kg.m <sup>3</sup>
Custo médio de Coleta em Curitiba (Ministério das Cidades, 2003)	R\$ 48,48 .t <sup>-1</sup>
Custo do Aterramento (Paes <i>et al.</i> , 2007)	R\$ 23,00 .t <sup>-1</sup>

Fonte: Araújo de Melo, Sautter e Janissek (2009).

Foram construídos seis cenários alternativos para a geração de RSU para o período de estudo (2008-2020) que abordaram diferentes alternativas de crescimento e redução da geração de resíduos. O cenário adotado como referência (realista) foi o que resultou da análise da tendência histórica. A Figura

9 apresenta a projeção de crescimento de resíduos sólidos urbanos, indicando uma tendência de crescimento até 2020, chegando a ultrapassar 600 mil toneladas anuais (Araújo de Melo *et al.*, 2009).

Figura 4510 - Projeção da geração de RSU em Curitiba para o período de 2008-2020



Fonte: Araújo de Melo, Sautter e Janissek (2009).

Avaliando os cenários construídos apresentados abaixo na Tabela 8, os autores destacam alternativas como diminuição e aumento de 5% da geração total (cenários 2 e 3), redução de 20% dos resíduos baseada no programa de coleta seletiva, ou seja, diminuindo a quantidade de recicláveis que é destinada ao aterro, mas poderia ser encaminhada a cooperativas (cenário 4). No cenário 5, foi considerada a implantação de um sistema de compostagem dos resíduos orgânicos que são encaminhados para aterro, o que possibilitaria uma redução de 10% do volume total. No cenário 6, os autores consideraram uma junção do cenário 4 e 5, contemplando programas de coleta seletiva (recicláveis) e compostagem, o que traria uma redução de 30% do volume total (Araújo de Melo *et al.*, 2009).

Tabela 1453 - Indicadores presentes na literatura e utilizados para estimativa dos impactos de geração de RSU na cidade de Curitiba

<b>Cenários (Metas)</b>	<b>Geração anual de RSU em 2020</b>		<b>Quant. em peso (t) 2008-2020</b>	<b>Quant. em volume (m³) 2008-2020</b>	<b>Custo para gerenciamento</b>	<b>Geração de metano (t) 2008-2020</b>
Cenário 1 (do nothing)	609.003	6.603.574	11.005.574	R\$ 29.760.367	193.582	Cenário 1 (do nothing)
Cenário 2 (-5% geração total)	578.553	6.273.395	10.455.659	R\$ 28.272.348	183.903	Cenário 2 (-5% geração total)
Cenário 3 (+5% geração total)	639.453	6.933.753	11.556.255	R\$ 31.248.385	203.262	Cenário 3 (+5% geração total)
Cenário 4 (-20% recicláveis )	559.674	6.068.684	10.114.091	R\$ 27.349.777	193.582	Cenário 4 (-20% recicláveis )
Cenário 5 (-10% orgânicos)	578.735	6.275.376	10.458.578	R\$ 28.281.276	183.961	Cenário 5 (-10% orgânicos)
Cenário 6 (-20% recicláveis e -10% orgânicos)	529.406	5.740.487	10.142.487	R\$ 25.870.686	168.281	Cenário 6 (-20% recicláveis e -10% orgânicos)

Fonte: Araújo de Melo, Sautter e Janissek (2009).

Diante do exposto, é evidente que a utilização de modelos de análise preditiva para construção de cenários futuros se destaca como uma técnica promissora de planejamento estratégico. Essa abordagem auxilia significativamente na tomada de decisões, definições de metas, planejamento de longo prazo e na avaliação da viabilidade de diferentes conjunturas. Fundamentada em dados, o que proporciona maior credibilidade e confiança aos resultados. É importante enfatizar que a utilização de modelos de análise

preditiva e cenários futuros pode ser empregada nas mais diversas áreas do conhecimento.

### **2.7.1. Análise multicritério para análise de cenários futuros**

A análise multicritério é uma técnica bastante empregada nas áreas de planejamento urbano, gestão ambiental, engenharia, economia, dentre outros. Essa metodologia auxilia na tomada de decisões complexas, pois tem como conceito básico que um único parâmetro/métrica não é suficiente para a tomada de decisões, possibilitando a análise de vários critérios simultaneamente.

A técnica de análise multicritério consiste basicamente em identificar os critérios de maior influência na tomada de decisão, podendo atribuir pesos diferentes para cada critério ou hierarquia entre estes (ponderação entre os critérios), avaliação de alternativas de agregação nos resultados através do emprego ou não de soma ou multiplicação ponderada e, por fim, uma análise de sensibilidade, avaliando como mudança de pesos ou valores altera os resultados obtidos ou gera novos cenários.

Em um estudo baseado em alternativas de gerenciamento da demanda de água, Frazão *et al.* (2006) utilizaram a avaliação multicritério e multidecisória para selecionar e identificar as melhores alternativas de gerenciamento da demanda de água na cidade de Campina Grande - João Pessoa. Desta forma, selecionou critérios relevantes nos aspectos econômicos, técnicos, sociais, legais e ambientais, baseados na avaliação dos participantes entrevistados.

A avaliação dos participantes baseou-se em categorias linguísticas inspiradas na lógica difusa, permitindo atribuir a dados qualitativos graus/valores de favorabilidade ou não. A aplicação da análise multicritério possibilitou uma equalização e entendimento das opiniões divergentes através da análise de subjetividade, o que conseqüentemente possibilitou uma escolha mais fundamentada para a tomada de decisão do gerenciamento da demanda de água.

Welton A. e Júnior Neto (2022) realizaram uma pesquisa a fim de obter uma prospecção de cenários para o saneamento básico no Brasil através das mudanças introduzidas pelo novo marco legal para o setor de saneamento até 2033. Uma das metodologias usadas foi a análise multicritério. Primeiramente, foram levantados os parâmetros/fatores que mais influenciavam o setor de

saneamento, em seguida os entrevistados atribuíram valores de quão provável aquele evento poderia ocorrer e qual a favorabilidade deste para o setor. Através desta análise, foi possível elaborar três cenários.

Em uma pesquisa realizada por Bispo (2023), foi utilizada análise multicritério com o objetivo de analisar serviços de saneamento básico dos municípios da microrregião de Catolé da Rocha. A metodologia empregada foi a *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, capaz de avaliar e classificar alternativas em função de critérios/fatores selecionados, atribuindo pesos ou valores para estes, correlacionando dados quantitativos e qualitativos de forma a mensurar o impacto da atribuição de valores/pesos nos critérios e propiciando a geração de diferentes cenários.

## 2.8. ANÁLISE CRÍTICA SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Messa *et al.* (2025) realizaram um estudo que tinha como objetivo identificar o potencial e as limitações do reuso do lodo de estação de tratamento de água, com ênfase nos princípios da economia circular, sua utilização benéfica e sustentável, levando em consideração os aspectos econômicos, sociais, ambientais e de saúde pública. A metodologia adotada na pesquisa foi uma revisão sistemática da literatura, baseada no método de busca em arquivos e bases de dados como *Scopus*, *Web of Science* e *Science Direct*. Os trabalhos encontrados foram categorizados de acordo com o uso benéfico mencionado em cada publicação e os setores de aplicação.

A análise bibliométrica realizada por Messa *et al.* (2025) resultou em 106 artigos em 31 países, o que apresenta um panorama global sobre o reuso do lodo de estação de tratamento de água no mundo, entre os anos de 2010 e 2024. Os autores ressaltam que há estudos em todos os continentes, com destaque para a China (16 artigos), Marrocos (13 artigos) e Brasil (12 artigos), sendo também o país do continente americano com mais publicações. A Figura 10 mostra as palavras-chave utilizadas pelos autores para revisão sistemática.

Figura 4766 - Fluxograma revisão sistemática sobre lodo de estação de tratamento de água (ETA)

Termos de busca inserido na ferramenta de busca avançada das bases de dados - (artigos 2010 -2024).

(title-abs-key ("drinking water" or potable and water) and title-abs-key ("content" or characterist) and title-abs-key ("mangement sludge" or "disposal sludge" or "treatment sludge" or "beneficial use sludge")

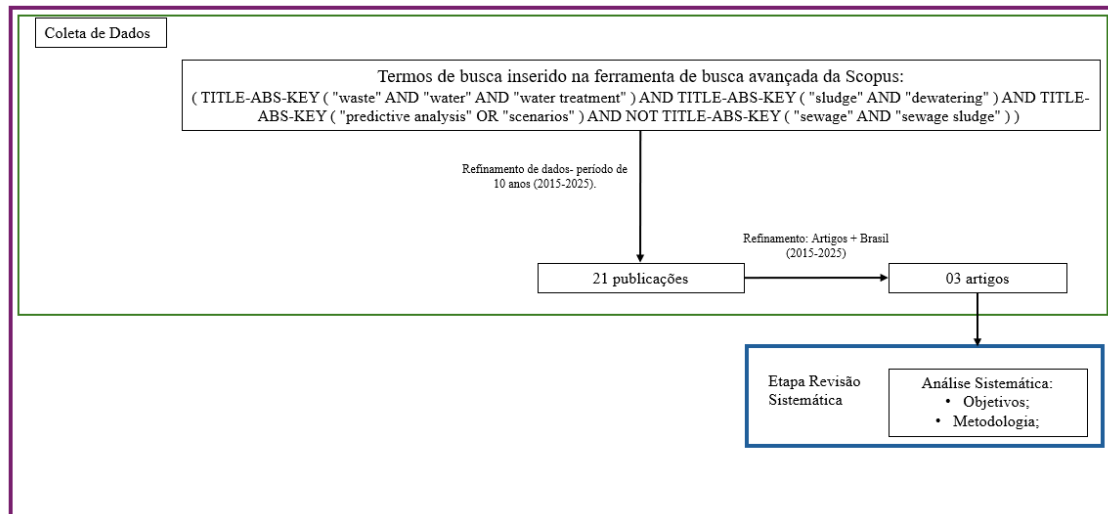
Fonte: Messa et al., 2025. Adaptado pela autora, 2025.

Embora o tema seja amplamente discutido a nível global, a maioria das pesquisas aponta para o uso benéfico deste resíduo na indústria da construção civil ou a presença de microrganismos e metais pesados na sua composição. Entretanto, a gestão desses resíduos ainda é um desafio, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento e aprimoramento de métodos e tecnologias para redução da geração, controle dos riscos e assegurar um descarte adequado (Messa; Jesus; Fiore, 2025).

Aliado a isto, (Urban et al., 2019) enfatiza que a maioria das pesquisas são realizadas em laboratório e não em escala real (prática). Os autores afirmam ainda que essa realidade é mais evidente nos países em desenvolvimento, o que não ocorre em países desenvolvidos, onde o uso benéfico do lodo é uma realidade há muito tempo.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe um passo inovador na gestão dos resíduos oriundos do tratamento de água, utilizando métodos de análise preditiva para construção de cenários futuros. Essa abordagem se justifica pela escassez de estudos científicos com essa visão aplicada à área de saneamento, e especialmente para o tema em estudo. Para identificar esta lacuna e fundamentar este estudo, foi feita uma busca de publicações científicas em base de dados como Scopus, empregando a “*string*” de busca apresentada na Figura 10, buscando englobar a análise preditiva e cenários futuros aplicados ao saneamento e resíduos.

Figura 5422 - Fluxograma da metodologia adotada para busca de publicações científicas em base de dados



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A busca foi realizada em 31/05/2025, no site da Scopus, retornando inicialmente 21 publicações. Analisando os resumos/abstracts e objetivos, revelou-se que 14 publicações abordam o tema sobre água residual, 03 de esgoto, 03 sobre tratamento de água e 01 sobre resíduos. Ao refinar a pesquisa com um recorte temporal (2015-2025) e local (publicações no Brasil), retornaram 03 artigos. A partir dessa análise exploratória, buscou-se realizar uma revisão sistemática das publicações brasileiras, extraíndo informações por meio da leitura dos artigos. O Quadro 6 apresenta a síntese dos artigos identificados.

Quadro 6 - Principais publicações relacionadas a Análise preditiva e cenários futuros aplicados ao saneamento e resíduos

<b>Principais Pesquisas Relacionadas a Análise Preditiva e Cenários Futuros</b>			
<b>Trabalho</b>	<b>Ano de publicação</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Metodologia</b>
Prospecção de cenários para o saneamento básico no Brasil: Um olhar sobre o novo marco legal do setor (Cintra Júnior <i>et al.</i> , 2022).	2022	Avaliar as mudanças introduzidas pela Lei 14.026/2020 que estabeleceu um novo marco legal para o setor de saneamento até 2033 e desenvolver cenários futuros para este setor.	1- Delphi (entrevista com gestores e profissionais da área); 2- Análise multicritério através da seleção de eventos que influenciariam o setor de saneamento e atribuição de valor para a probabilidade de ocorrência deste evento e sua favorabilidade ao setor; 3-Método Grumbach e Levantamento de forças motrizes influentes no setor para elaboração de cenários futuros (otimista, realista e pessimista).
Monitoramento da expansão urbana, cenários futuros de crescimento populacional e o consumo de recursos hídrico no Município de São Carlos, SP (Costa <i>et al.</i> , 2013).	2013	Analisar a expansão urbana da cidade de São Carlos -SP com o foco no crescimento populacional e na superfície impermeabilizada no decorrer de um período de 44 anos e interpretar os impactos do crescimento urbano quanto ao uso e ocupação do solo, a sustentabilidade das cidades e nos recursos hídricos.	1- Mapeamento foram utilizadas imagens de satélites e fotografias que foram georreferenciadas (metodologia proposta por Jansen (2009); 2- Metodologia proposta por Lópex (2001) e Jat <i>et al.</i> ; que se baseia em modelos matemáticos para elaboração de cenários futuros.

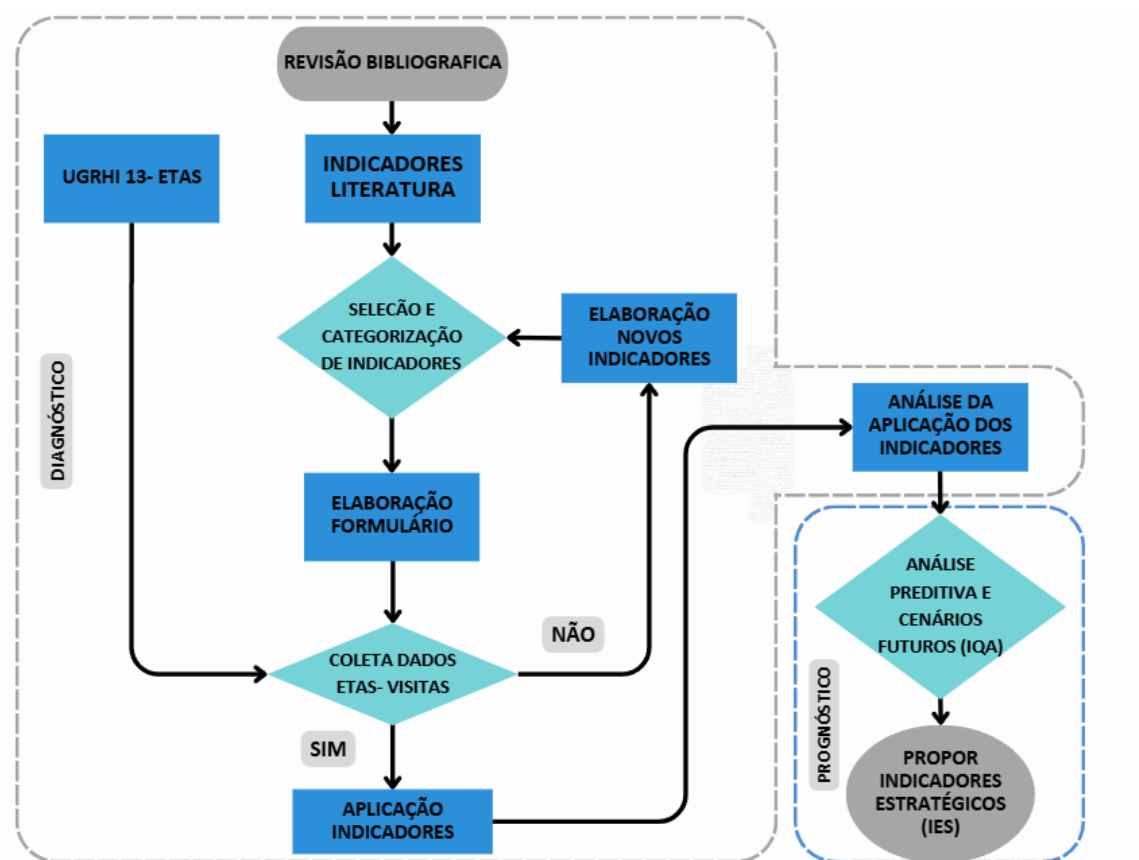
Trabalho	Ano de publicação	Objetivo	Metodologia
Estudos de cenários para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos de Curitiba (Araújo de Melo <i>et al.</i> , 2009).	2009	Utilizar a técnica de cenários futuros como ferramenta de planejamento de gestão de resíduos sólidos urbanos na cidade de Curitiba.	1- Entrevista com gestores públicos para coleta de informações baseada em formulário; 2-Metodologia proposta por Tavares (2007) de caracterização gravimétrica baseado em dados históricos de geração de resíduo; 3-Estimativa Populacional foi feita através de dados históricos de censo demográfico do IBGE ; 4- estimativa do PIB , baseado no índice IPCA; 5- Construção dos cenários foi utilizado o método de Regressão múltipla. 6- Para referenciar a análise dos resultados forma considerados indicadores disponíveis na literatura.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3. METODOLOGIA

O procedimento metodológico com as etapas para desenvolvimento desta pesquisa é representado no fluxograma da Figura 12.

Figura 5918 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A abordagem utilizada nesta pesquisa envolveu a análise da literatura sobre a utilização de indicadores como instrumentos de gestão para os resíduos gerados no tratamento de água. A seleção dos indicadores foi feita a partir de pesquisas científicas pertinentes ao assunto. A partir desta revisão bibliográfica, foi possível selecionar, adaptar e criar um grupo de indicadores.

Em continuidade, os indicadores foram organizados em tabelas e separados em categorias. A categorização dos indicadores foi fundamentada na proposta de Matos *et al.* (2005), uma publicação internacional significativa sobre a utilização de indicadores de desempenho como ferramenta de gestão para águas residuais. É importante mencionar que Galdophi (2023) também utilizou essa proposta para indicadores de desempenho como instrumento de gestão para lodo de esgoto, gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

Concomitantemente à seleção e categorização dos indicadores, a área de abrangência desta pesquisa foi delimitada através de um levantamento do

número de estações de tratamento de água (ETAs) que operam em ciclo completo na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13). Esse levantamento foi feito com base em pesquisa no site Atlas Águas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Com base nos indicadores estabelecidos, foi identificada a necessidade de coletar dados para sua aplicação. Assim, foi elaborado um formulário constante no Anexo A (Formulário de Coleta de Dados), destinado a ser aplicado aos gestores das estações de tratamento de água durante as visitas.

Após a coleta de dados durante as visitas às estações de tratamento de água, as informações foram organizadas e compiladas em planilhas para a aplicação dos indicadores nas estações de tratamento de água na (UGRHI 13) - Tietê-Jacaré. O *Excel* foi o *software* utilizado para tabular os dados e gerar representações gráficas dos indicadores. A análise dos indicadores selecionados foi realizada com base nos gráficos gerados a partir dos dados coletados.

Em continuidade à pesquisa, foi realizado um levantamento de dados históricos do Índice de Qualidade das Águas (IQA), constante nos relatórios de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), no Portal da Qualidade das Águas da Agência Nacional de Águas (ANA) e nos relatórios de situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré, publicados pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré. Esse estudo classifica-se como um estudo longitudinal, uma vez que serão analisados dados do período de (2013-2023). Essa escolha visa correlacionar a qualidade da água dos mananciais com o volume de lodo gerado e os achados da análise dos indicadores. A utilização do IQA fundamenta-se por sua aplicação em nível nacional para a avaliação da qualidade da água dos corpos hídricos, o que assegura maior credibilidade aos resultados obtidos.

Com base na análise do relatório de águas interiores da CETESB, identificou-se que a UGRHI 13 (Tietê-Jacaré) dispõe de 16 pontos de monitoramento. No entanto, devido à ausência de dados históricos em seis desses pontos para o período de (2013-2023), a pesquisa foi realizada com os 10 pontos restantes, o que corresponde a mais de 60% do total, garantindo a representatividade necessária para o estudo.

O histórico de dados referentes ao IQA foi sistematizado em planilhas, para posterior aplicação de um modelo de análise preditiva de regressão mista em cada ponto de coleta. O objetivo desta etapa foi verificar a existência de uma tendência aparente nos dados, considerando a localização dos pontos de monitoramento e períodos. Ao sistematizar os dados do IQA, percebeu-se que faltavam valores para os anos de 2020 e 2021 (em alguns pontos), este fato se deve à pandemia de COVID-19. Desta forma, com o intuito de evitar perda de informações relevantes e aumentar o poder estatístico através de um conjunto de dados mais completo, foi aplicado o método de imputação de valor pela mediana para preencher essas lacunas. O método de imputação de valores pela mediana é utilizado na estatística para atribuir dados numéricos.

Em virtude da classificação dos valores de IQA em faixas distintas para cada estado brasileiro, influenciada por uma variedade de fatores como realidades ambientais, prioridades de gestão, legislação específica e diferenças nas características naturais, a presente pesquisa optou pela classificação de faixas estabelecida pela CETESB como referencial para a categorização dos cenários construídos com base nos valores de IQA, já que esta pesquisa tem como base uma Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. A construção dos gráficos do IQA foi realizada em *Python*, para isso foram utilizadas as seguintes bibliotecas: *pandas (pd)*, *matplotlib.pyplot(plt)*, *seaborn (sns)*, *statsmodels.formula.api.mixedim*, *numpy(np)*, *re*.

Para montagem dos cenários, foi elaborada uma tabela fundamentada em dados da literatura (índices) para estimativa do volume de lodo gerado a partir do volume de água tratada. Também foram utilizados dados populacionais constantes no site Atlas de Água (ANA) fornecidos pelo IBGE, juntamente com o resultado dos indicadores obtidos na fase de diagnóstico, visando à construção de um cenário realista. Para correlacionar os dados dos indicadores (qualitativos) na fase de diagnóstico com os dados estimados (quantitativos) baseados na literatura, aplicou-se a análise de múltiplos critérios, que foi utilizada por Welton A. e Júnior Neto (2022), Frazão *et al.* (2006) e Bispo (2023).

Esta metodologia permite a comparação de variáveis quantitativas e qualitativas, incluindo aquelas com elevado grau de subjetividade. Além de facilitar a comparação de cada alternativa com todas as demais, permitindo ou não a hierarquização dessas variáveis. Para este estudo, selecionamos e

aplicamos apenas os aspectos conceituais da análise de múltiplos critérios. Desta forma, assumimos que todos os indicadores possuem o mesmo peso, não empregando a etapa de ponderação entre os critérios.

Portanto, para a análise multicritério foram atribuídos valores numéricos para cada indicador que tinha como medida “sim” ou “não” para cada ETA visitada. O objetivo foi estabelecer um Score ou coeficiente final que quantificasse esses indicadores. A fórmula utilizada para cálculo do Score, foi o produto dos valores atribuídos a todos os indicadores selecionados, conforme fórmula apresentada abaixo na Figura 13.

Figura 13 - Equação para cálculo do score de análise preditiva (SAP)

$$\text{Score de análise preditiva (SAP)} = (\text{ID06} \times \text{IQAxID19} \times \text{ID23} \times \text{ID20} \times \text{ID21} \times (\text{ID25} + \text{ID26}) \times \text{ID27} \times \text{ID28})$$

Posteriormente, este valor encontrado será correlacionado com o volume de resíduo estimado baseado na literatura. Desta forma, será possível obter um volume final de resíduo que integra variáveis qualitativas e quantitativas relacionadas à geração de resíduos do tratamento de água.

Após a elaboração do cenário realista, foi feita uma análise da situação de cada ETA para este cenário baseado no valor de score encontrado. Para isto, foi empregada a metodologia da matriz de estratificação por intervalos, que combina a estratificação de dados com a classificação ordinal, criando uma estrutura sistemática para análise de cenários. Para isto, foi feita uma divisão de classes com intervalos de mesma amplitude, conforme mostra o Quadro 7. Silva (2021) utilizou em sua pesquisa um índice de classificação para elencar o nível de aplicação dos indicadores a fim de facilitar a interpretação dos dados.

Quadro 7 - Matriz de classificação de cenários

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO CENÁRIO	
Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A partir do cenário realista, foram elaborados cenários otimista e pessimista para o horizonte de 2035, considerando alterações no volume de resíduos utilizando dados da literatura e nos seguintes indicadores relacionados ao LETA: proteção dos pontos de captação (ID 06), lançamento LETA em corpos d'água (ID 19), desaguamento (ID 20), secagem (ID 21). Quanto à ALAF, foram feitas alterações nos seguintes indicadores: proteção dos pontos de captação (ID 06), lançamento em corpos d'água (ID 24), destinação ou forma de lavagem dos filtros (ID 22), reuso/reciclagem/recirculação (ID 16). Posteriormente, foi realizada a classificação de cada ETA, para o cenário otimista e pessimista, baseado na matriz de classificação de cenário.

A partir da análise dos cenários elaborados e fundamentado no estudo de Galdophi (2023) sobre o uso de indicadores na gestão de lodo de ETE, propuseram-se 06 indicadores estratégicos (IEs), cuja seleção obedeceu ao critério de escolher incluir no mínimo um e no máximo dois indicadores por categoria. A seleção dos indicadores estratégicos visou incluir aqueles que permitissem avaliar a universalização, o potencial de geração futura, a relação entre análise do lodo e dados do IQA, a destinação do lodo em relação à condição do corpo hídrico, a infraestrutura das ETAs para tratamento do lodo com foco em economia circular, e o planejamento dos municípios quanto ao aumento da demanda de água e do IQA.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados foram divididos em duas partes, uma fase de diagnóstico para avaliar a condição atual de cada uma das Estações de Tratamento de Água objetos deste estudo. A fase de prognóstico foi realizada para prevê diferentes cenários para essas ETAs considerando diferentes condições futuras.

##### **4.1. SELEÇÃO E AGRUPAMENTO DE INDICADORES**

Com base na pesquisa bibliográfica, foram selecionados diversos indicadores presentes na literatura, alguns dos quais foram adaptados para este estudo, enquanto outros foram desenvolvidos pelo autor, o que resultou em trinta indicadores, distribuídos em seis categorias, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Seleção de indicadores para aplicação nos resíduos do saneamento

<b>INDICADORES SELECIONADOS PARA APLICAÇÃO NOS RESÍDUOS DO SANEAMENTO - ETAS</b>				
<b>FONTE</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDADE MEDIDA</b>	<b>CATEGORIA</b>
AUTOR	ID 01	POPULAÇÃO ATENDIDA NO MUNICÍPIO COM ÁGUA TRATADA	%	GERAL
AUTOR	ID 02	POPULAÇÃO ATENDIDA NO MUNICÍPIO COM ESGOTAMENTO SANITÁRIO	%	GERAL
LITERATURA	ID 03	PRODUÇÃO PER CAPITA DE ÁGUA TRATADA	L/ HAB. DIA	GERAL
AUTOR	ID 04	PORCENTAGEM LOCALIZAÇÃO DAS ETAS (URBANO/ RURAL)	%	GERAL
AUTOR	ID 05	LOCALIZAÇÃO DO PONTO DE CAPTAÇÃO (URBANO/ RURAL)	%	GERAL
AUTOR	ID 06	PONTOS DE CAPTAÇÃO QUE ESTÃO PROTEGIDOS POR VEGETAÇÃO NATIVA	%	GERAL
LITERATURA	ID 07	PORCENTAGEM DAS ETAS POR TIPO DE COAGULANTE UTILIZADO	%	GERAL
LITERATURA	ID 08	PORCENTAGEM DAS ETAS COM ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA OU PRIVADA	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 09	PERCENTAGEM DAS ETAS QUE MEDEM OU ESTIMAM A QUANTIDADE DE LETA	%	GESTÃO
ADAPTADO DA LITERATURA	ID 10	PORCENTAGEM DAS ETAS QUE CARACTERIZAM PERIODICAMENTE O LETA GERADO	%	GESTÃO
ADAPTADO DA LITERATURA	ID 11	PORCENTAGEM DAS ETAS QUE JÁ REALIZARAM EM ALGUM MOMENTO A ANÁLISE DO LETA	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 12	PORCENTAGEM DAS ETAS QUE REUSAM OU RECICLAM O LETA	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 13	PORCENTAGEM DAS ETAS QUE MEDEM OU ESTIMAM A QUANTIDADE DE ALAF	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 14	PORCENTAGEM DAS ETAS QUE ALGUMA VEZ CARACTERIZAM A ALAF	%	GESTÃO

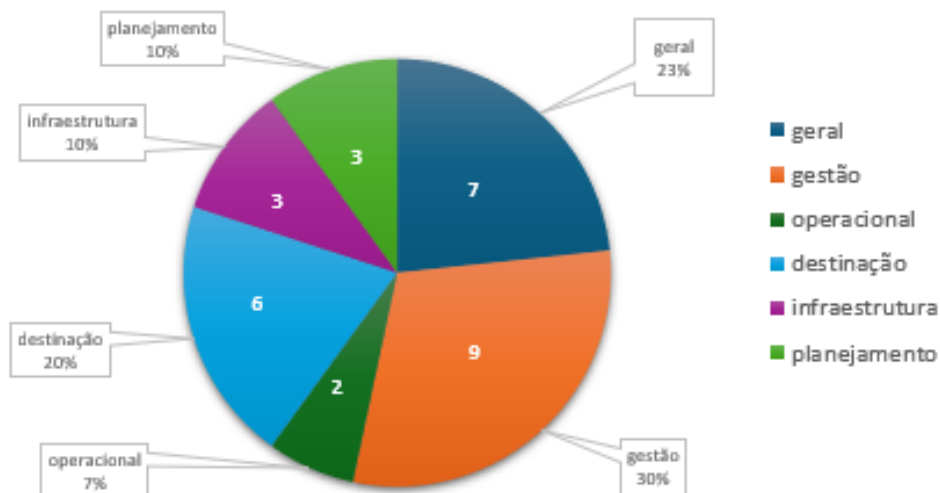
<b>INDICADORES SELECIONADOS PARA APLICAÇÃO NOS RESÍDUOS DO SANEAMENTO - ETAs</b>				
<b>FONTE</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDADE MEDIDA</b>	<b>CATEGORIA</b>
ADAPTADO DA LITERATURA	ID 15	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE NUNCA CARACTERIZARAM A ALAF	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 16	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE REUSAM / RECICLAM A ALAF	%	GESTÃO
LITERATURA	ID 17	FORMA DE LIMPEZA DOS DECANTADORES NAS ETAs	UND	OPERACIONAL
LITERATURA	ID 18	QUANTIDADE DE ETAs QUE REALIZAM DESCARGAS DE FUNDO DIARIAMENTE	UND	OPERACIONAL
LITERATURA	ID 19	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE LANÇAM O LETA EM CORPOS D'ÁGUA	%	DESTINAÇÃO
LITERATURA	ID 20	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE REALIZAM DESAGUAMENTO DO LODO	%	DESTINAÇÃO
LITERATURA	ID 21	PORCENTAGEM DE ETAs QUE FAZEM SECAGEM DO LODO APÓS DESAGUAMENTO	%	DESTINAÇÃO
LITERATURA	ID 22	FORMA DE LAVAGEM DOS FILTROS (ÁGUA/ÁGUA+ AR)	UND	DESTINAÇÃO
AUTOR	ID 23	PORCENTAGEM DE ETAs QUE ENCAMINHAM O LETA PARA ETE	%	DESTINAÇÃO
LITERATURA	ID 24	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE LANÇAM A ALAF EM CORPOS D'ÁGUA	%	DESTINAÇÃO
AUTOR	ID 25	ETAs COM MAIS DE 50 ANOS DE IMPLANTAÇÃO	%	INFRAESTRUTURA
AUTOR	ID 26	PORCENTAGEM DA ETAs QUE PASSARAM POR ALGUMA REFORMA NO DECORRER DOS ANOS DE OPERAÇÃO	%	INFRAESTRUTURA
AUTOR	ID 27	PORCENTAGEM DA ETAs QUE PASSARAM POR ALGUMA REFORMA NO DECORRER DOS ANOS DE OPERAÇÃO	%	INFRAESTRUTURA

INDICADORES SELECIONADOS PARA APLICAÇÃO NOS RESÍDUOS DO SANEAMENTO - ETAs				
FONTE	CÓDIGO	INDICADOR	UNIDADE MEDIDA	CATEGORIA
AUTOR	ID 28	PORCENTAGEM DAS ETAs QUE TEM PREVISÃO DE IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE LODO (ETL)	%	PLANEJAMENTO
AUTOR	ID 29	PORCENTAGEM DE ETAs QUE TEM PROJETO EM DESENVOLVIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DE ETL	%	PLANEJAMENTO
AUTOR	ID 30	PORCENTAGEM DOS MUNICÍPIOS QUE TEM ESTUDOS DE AUMENTO DE DEMANDA DE ÁGUA TRATADA	%	PLANEJAMENTO

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os indicadores foram agrupados em seis categorias: geral, gestão, operacional, destinação, infraestrutura e planejamento. Essa organização tem como objetivo não somente avaliar a geração e destinação de resíduos, mas demonstrar a natureza cíclica do tratamento de água, evidenciando a interdependência dos processos. O Gráfico 1 da Figura 14 apresenta a distribuição dos indicadores por categorias e sua proporção em relação ao total.

Figura 14 - Gráfico de distribuição dos indicadores propostos por categoria



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A categoria de gestão apresenta a maior representatividade (30% do conjunto total), compreendendo o maior número de indicadores, especificamente 9. Este conjunto de indicadores dedica-se à avaliação de aspectos concernentes ao tipo de administração, à geração e à caracterização dos resíduos produzidos no tratamento de água. A categoria geral ocupa a segunda posição em termos de representatividade, englobando 7 indicadores, o que corresponde a 23% do total, e analisa questões relativas à universalização, aos pontos de captação e à localização das ETAs.


Em sequência, a categoria de destinação, com 6 indicadores, possui uma representatividade de 20% em relação à totalidade. Estes indicadores versam sobre a destinação do LETA e do ALAF.

As categorias de infraestrutura e planejamento apresentam uma representatividade equivalente a 10% cada, totalizando 3 indicadores por categoria. A análise destas se estende desde a avaliação da idade das estações até estudos para a implantação de uma Estação de Tratamento de Lodo (ETL). Por fim, a categoria de menor representatividade é a operacional, equivalente a 7%, totalizando 2 indicadores. Estes indicadores estão relacionados com as formas de limpeza dos decantadores.

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS TIETÊ-JACARÉ (UGRHI-13)

Em paralelo ao levantamento, seleção e categorização de indicadores, foi definida a área de abrangência desta pesquisa, que foi a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13), localizada no estado de São Paulo. Essa escolha teve como base os croquis e indicadores municipais consultados no painel de indicadores no site Atlas Águas da Agência Nacional de Águas (ANA). Através do painel de indicadores, foi possível coletar dados sobre a universalização, população, quantidade de ETAS que operam ciclo completo e mananciais, o que resultou na Tabela 9.

Tabela 2106 - Caracterização da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê- Jacaré

CARACTERIZAÇÃO DA UGRHI TIETÊ JACARÉ - (UGRHI-13)								
MUNICÍPIO	MANANCIAIS DE CAPTAÇÃO SUPERFICIAL		POPULAÇÃO		AUMENTO NÚMERO DE PESSOAS (2022-2035)	AUMENTO POPULAÇÃO (%)	COBERTURA ABASTECIMENTO DE ÁGUA (%)	QUANTIDADE DE ETAS CICLO COMPLETO
			2022 (IBGE)	PROJEÇÃO (2035) - ATLAS ANA				
MUNICÍPIO 01	REPRESA ANHUMAS (RIBEIRÃO ANHUMAS), REPRESA DAS CRUZES (RIBEIRÃO DAS CRUZES)	CÓRREGO ÁGUAS DO PAIOL	242.228	260.574	18.346	7,57%	96,98%	2
MUNICÍPIO 02	CÓRREGO DAS ÁGUAS CLARAS	CÓRREGO DA MINHOCA	23.898	23.624	-274	-1,15%	99,38%	2
MUNICÍPIO 03	RIO JAU	RIBEIRÃO POUSO ALEGRE	133.497	166.680	33.183	24,86%	96,90%	1
MUNICÍPIO 04	RIO LENÇÓIS		66.505	75.056	8.551	12,86%	98,78%	1
MUNICÍPIO 05	RIBEIRÃO FEIJÃO	MONJOLINHO	254.857	274.535	19.678	7,72%	100,00%	1
MUNICÍPIO 06	RIBEIRÃO DOS PINHEIROS		9.335	9.848	513	5,50%	83,27%	1

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

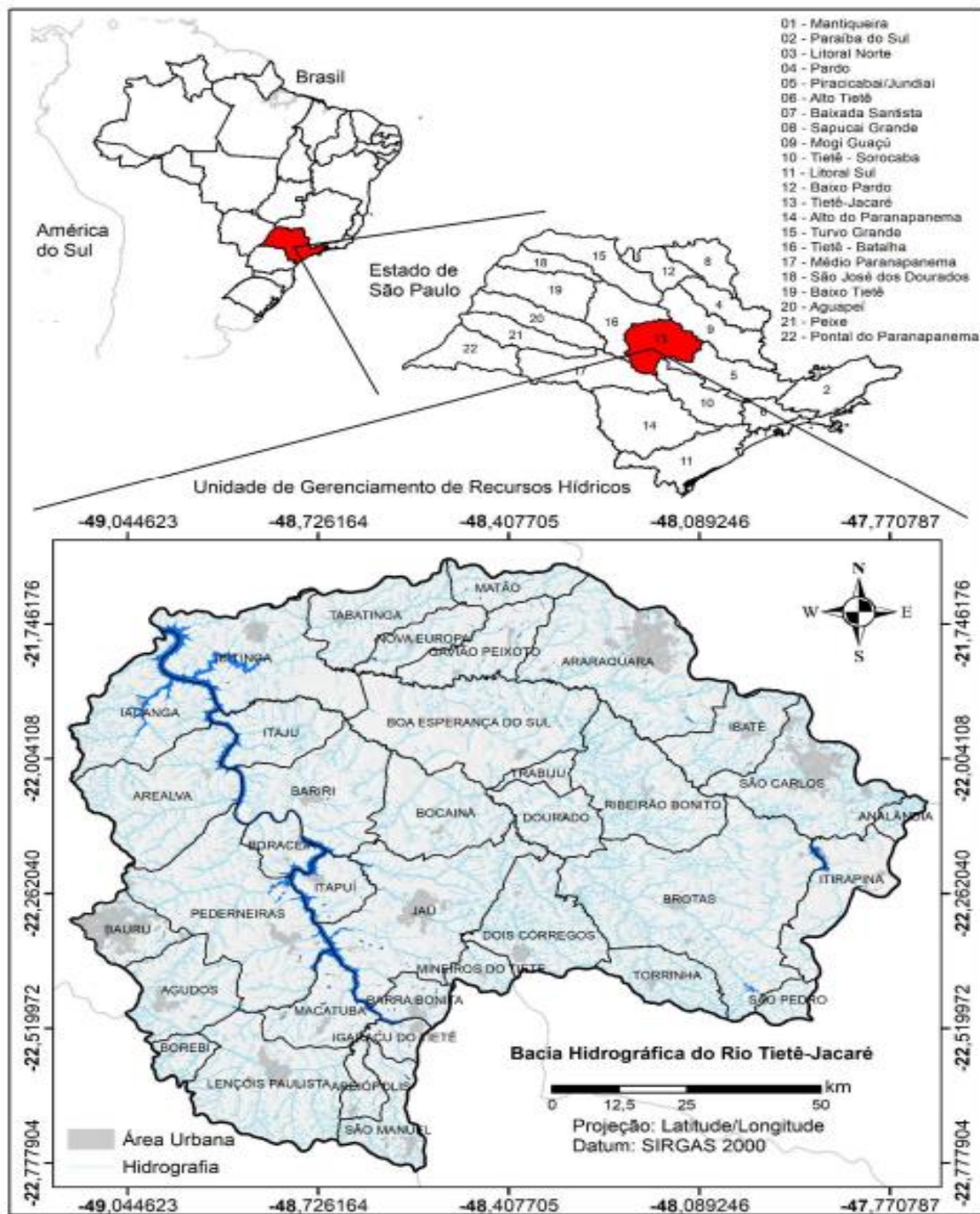
De acordo com a Tabela 9 os 6 (seis) municípios da UGRHI 13 possuem um total de 8 (oito) ETAs de ciclo completo, com populações que variam de cerca de 10 a 260 mil habitantes. A porcentagem de cobertura de abastecimento de água varia de 83 a 100 por cento.

O Atlas de Água da Agência Nacional de Águas (ANA), apresenta uma projeção de população para o ano de 2035, baseado em dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e estatística (IBGE) com o objetivo de prever questões relacionadas ao aumento de demanda de água, conforme apresentado na Tabela 9 para os municípios em estudo.

A UGRHI 13 localiza-se na região central do Estado de São Paulo, é composta por 34 municípios, abrange cerca de 3,6% da população. Seus principais rios são: Tietê, Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu. Seus principais

mananciais superficiais são: Rio Lençóis, Itaquerê, Jacaré-Guaçu, Jacaré-Pepira e Jaú. Faz divisa com as UGRHI 5 (Piracicaba/Capivari/Jundiaí), UGRHI 9 (Mogi-Guaçu), UGRHI 10 (Tietê/Sorocaba), UGRHI 16 (Tietê/Batalha) e UGRHI 17 (Médio Paranapanema). A Figura 15 apresenta a localização geográfica da UGRHI 13 (Tietê – Jacaré) e seus municípios integrantes.

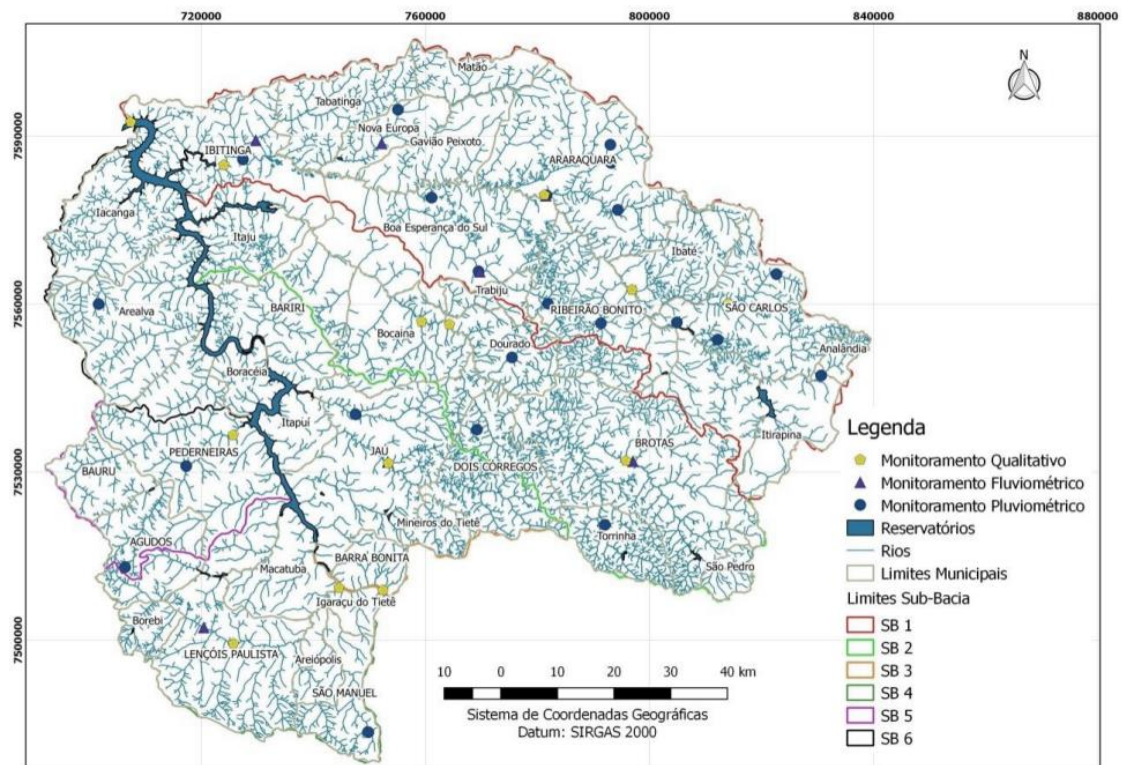
Figura 69025 - Localização geográfica da UGRHI 13 (Tietê- Jacaré)



Fonte: Trevisan *et al.*, 2019.

A bacia hidrográfica Tietê – Jacaré é dividida em seis sub-bacias, cada uma correspondendo à área de drenagem de seus principais rios: Jacaré-Guaçu, Jacaré Pepira, Jaú, Ave Maria e Sapé, Bauru, Ribeirão Grande e Pederneiras, Rio Claro, Ribeirão Bonito, Ribeirão de Veado e Ribeirão da Água Limpa. A Figura 16 ilustra a delimitação das sub-bacias da UGRHI 13.

Figura 76316 - Delimitação das Sub-bacias da UGRHI 13 (Tietê- Jacaré)



Fonte: São Paulo, 2022.

Atualmente, as principais atividades da região estão ligadas à agroindústria (açúcar, álcool e processamento de cítricos). Em Bauru, São Carlos, Araraquara e Jaú, outros setores da indústria, como papel, bebidas, calçados e metalmecânica, merecem destaque.

Após a definição da área de aplicação desta pesquisa e com base nos indicadores selecionados, foi elaborado um formulário para coleta de dados constante no Apêndice A (Formulário de Coleta de Dados), que foi aplicado aos gestores das estações de tratamento de água durante as visitas com o objetivo de levantar dados para viabilizar a aplicação dos indicadores.

#### 4.3. APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS INDICADORES NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS TIETÊ-JACARE

A aplicação dos indicadores gerais foi feita visando obter critérios para avaliação do cenário atual dos municípios, quanto à universalização, produção per capita de água, localização dos pontos de captação e das ETAs, conservação da vegetação nativa em torno dos pontos das captações e o tipo de coagulante. A Tabela 10 apresenta dados relacionados à universalização.

Tabela 2170 - Indicadores gerais ID 01, ID 02, ID 03, análise quanto a universalização

<b>Código</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Município 01</b>	<b>Município 02</b>	<b>Município 03</b>	<b>Município 04</b>	<b>Município 05</b>	<b>Município 06</b>	<b>Média de Municípios</b>
ID 01	População atendida com água tratada (%)	96,98%	99,38%	96,90%	98,78%	100%	83,27%	
ID 02	População atendida com esgotamento sanitário (%)	97,27	99,38%	96,90%	98,78%	100%	81,83%	
ID 03	Produção per capita de água (l/hab. dia)	229,14	209,15	183,83	357,21	261,09	171,6	

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

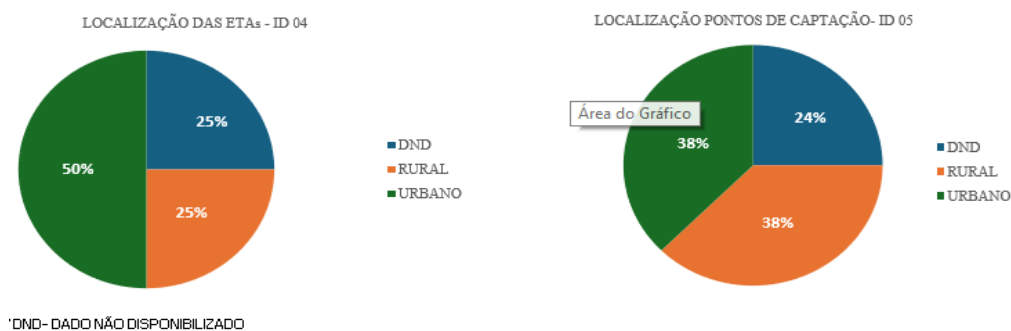
Segundo dados coletados no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), tendo como ano base 2022, foram levantados dados de atendimento da população com água tratada, esgotamento sanitário e produção per capita de água tratada (l/hab.dia) para os municípios que possuem ETAs de ciclo completo pertencentes à UGRHI 13. É importante destacar que os dados do SNIS são auto declaratórios.

Ao analisar os dados de atendimento da população com água tratada (ID 01), percebe-se que apenas 01 município possui atendimento pleno, e que o município 06 possui cobertura de 83,27%, abaixo da média dessas cidades. Em relação ao atendimento da população por esgotamento sanitário (ID 02), apenas o município 06 está abaixo da média de 95,69% e somente o município 05 declara 100% de cobertura.

Em relação à produção per capita de água tratada (ID 03), percebe-se uma tendência entre as cidades de aproximadamente 200 (l/hab. dia), estando até abaixo do valor médio que é de 235,35 (l/hab. dia). Destaca-se o município 04, com uma produção per capita de água tratada de 357,21 (l/hab. dia), aproximadamente 120 (l/hab. dia) acima da média.

Ao avaliar o indicador ID 04 e ID 05, respectivamente, ambos representados no gráfico da Figura 17, observa-se que 50% das estações de tratamento de água encontram-se localizadas em meio urbano em relação a 25% localizadas em meio rural. Atribuiu-se às ETAs que não disponibilizaram o dado ou não foi realizada visita a sigla (DND). Em relação à localização dos pontos de captação, observa-se uma distribuição igualitária, estando 38% localizado em zona urbana e 38% em zona rural.

Figura 17 – Gráfico dos percentuais da localização das ETAs (ID 04) e da localização dos pontos de captação (ID 05)



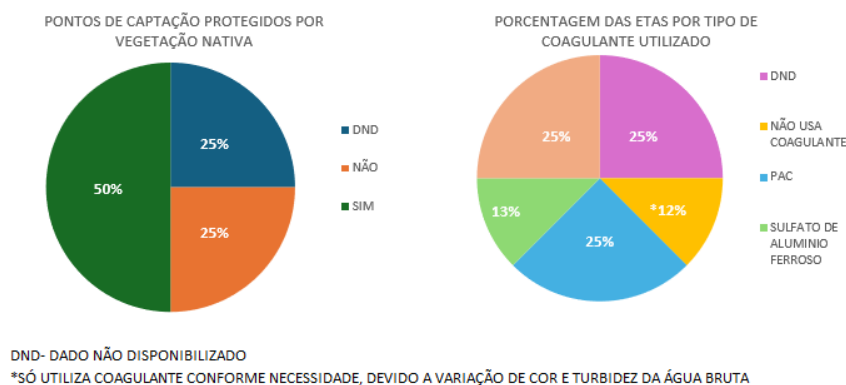
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Quanto à proteção dos pontos de captação por mata ciliar (ID 06), percebe-se que 50% dos pontos possuem proteção de vegetação, enquanto 25% não possuem vegetação, alguns estando rodeados de construções e localizados em ambiente totalmente urbanizado. Em relação ao tipo de coagulante utilizado (ID 07), nota-se uma proporção na adoção dos coagulantes em que 25% das ETAs utilizam policloreto de alumínio (PAC) e estão localizadas em cidades diferentes, 25% utilizam tanino e estão localizadas no mesmo município, 13% utilizam sulfato de alumínio ferroso.

O uso de coagulantes orgânicos como o Tanino, geram impactos positivos na geração de lodo de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), se resumindo em dois principais aspectos: redução do volume de lodo, pois promovem floculação primeiramente por adsorção e formação de pontes entre as partículas de sujeira, resultando na formação de um lodo mais denso e conseqüentemente menos volumoso. Além disso, o lodo passa a ser composto predominantemente por matéria orgânica biodegradável, o que propicia mais opções de reuso para esse resíduo. Os indicadores ID 06 e ID 07 estão representados no gráfico da Figura 18.

Vale enfatizar que uma das ETAs não faz uso de coagulante, devido aos parâmetros da água bruta de cor e turbidez serem muito próximos ao exigido pela Portaria nº 888/21 do Ministério da Saúde, que dispõe sobre procedimentos de controle da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, que é de 0,5 uT (unidade de Turbidez) (Brasil, 2021).

Figura 90888 - Gráfico dos percentuais dos pontos de captação protegidos por vegetação nativa (ID 06); Porcentagem das ETAs por tipo de coagulante utilizado (ID 07), respectivamente



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

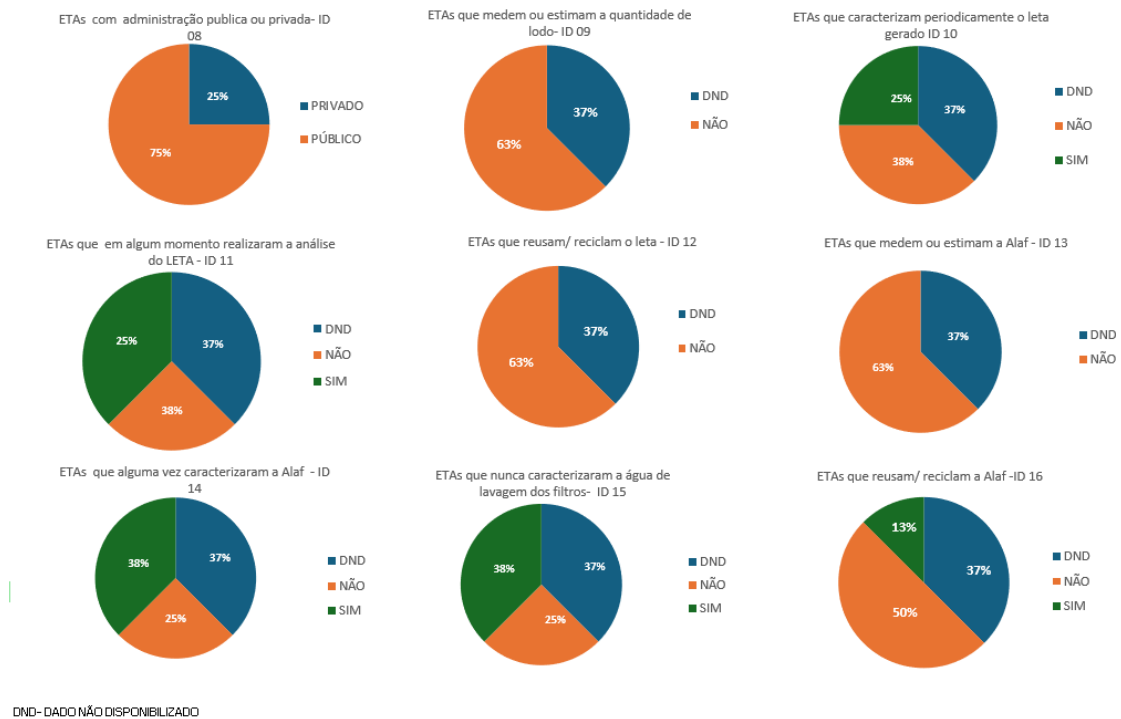
O grupo de indicadores de gestão (ID 08 ao ID 16) está apresentado no gráfico da Figura 19. No que diz respeito à administração pública ou privada das companhias de saneamento dos municípios (ID 08), mesmo após a publicação da Lei 14026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), ainda há uma predominância da administração pública nesse setor. O domínio da administração pública neste setor é de 75% comparado com a administração privada.

A ausência de medição ou estimativa do LETA em 63% das ETAs (ID 09) impede o conhecimento do volume de resíduos gerados. A não realização da caracterização periódica do LETA por aproximadamente 37% das estações de tratamento de água (ID 10) implica no desconhecimento da composição físico-química e biológica do lodo. Apenas 25% das ETAs efetuam estas análises regularmente. Este cenário pode acarretar vários problemas de gestão e gerenciamento deste resíduo, haja vista que é preciso conhecer a composição do resíduo para que o seu manejo seja realizado de forma adequada.

Dando seguimento à análise, o ID 11 confirma que essa ausência de análise do resíduo é uma constante, pois somente 25% das ETAs em algum momento fizeram uma análise do LETA, enquanto 38% nunca realizaram, o que compromete o entendimento sobre a composição do resíduo e conseqüentemente a gestão deste. O indicador ID 12 mostra que 50% das ETAs não reusam/reciclam o lodo gerado, apenas 13% fazem tal prática, e as demais não disponibilizaram dados sobre este indicador.

Em relação às estações de tratamento de água que medem ou estimam a ALAF (ID 13), 63% não conhecem o volume de ALAF gerado no processo de tratamento, nem o estimam. No que se refere à caracterização da ALAF pelas estações de tratamento de água (ID 14 e ID 15), 25% das ETAs não realizam essa caracterização periodicamente ou nunca a fizeram, enquanto 38% das estações caracterizam a ALAF ou já fizeram essa análise em algum momento. Quanto às ETAs que reusam/reciclam a ALAF (ID 16), observa-se um cenário parecido ao ID 12 para o LETA, no qual apenas 13% das ETAs reusam este resíduo, enquanto 50% não o fazem.

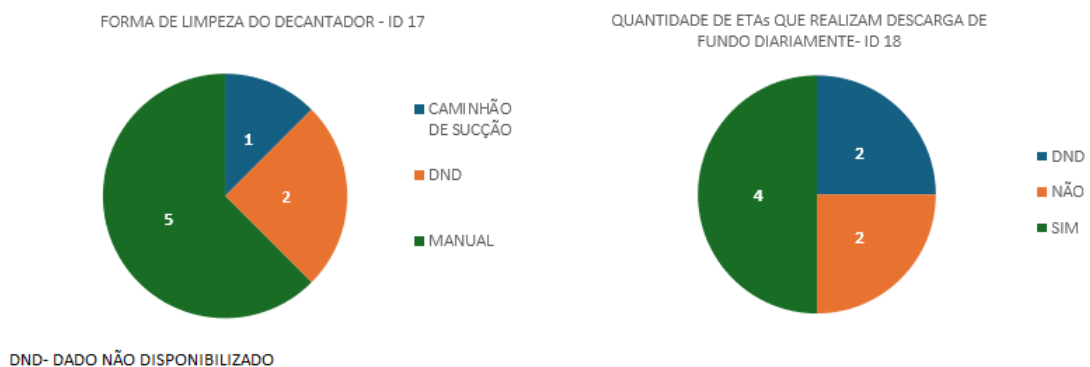
Figura 98169 - Gráfico do grupo de indicadores de Gestão (ID 08 A ID 16)



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os indicadores operacionais ID 17 e ID 18 dizem respeito, respectivamente, ao procedimento de limpeza dos decantadores nas estações de tratamento de água e ao número de ETAs que efetuam a descarga de fundo diariamente. A análise dos indicadores apresentados no gráfico da Figura 20 demonstra que cinco ETAs ainda realizam a limpeza manual de seus decantadores. No que tange à prática de descarga de fundo, quatro ETAs o fazem diariamente.

Figura 20 - Gráfico do grupo de indicadores operacionais (ID 17 A ID 18)



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

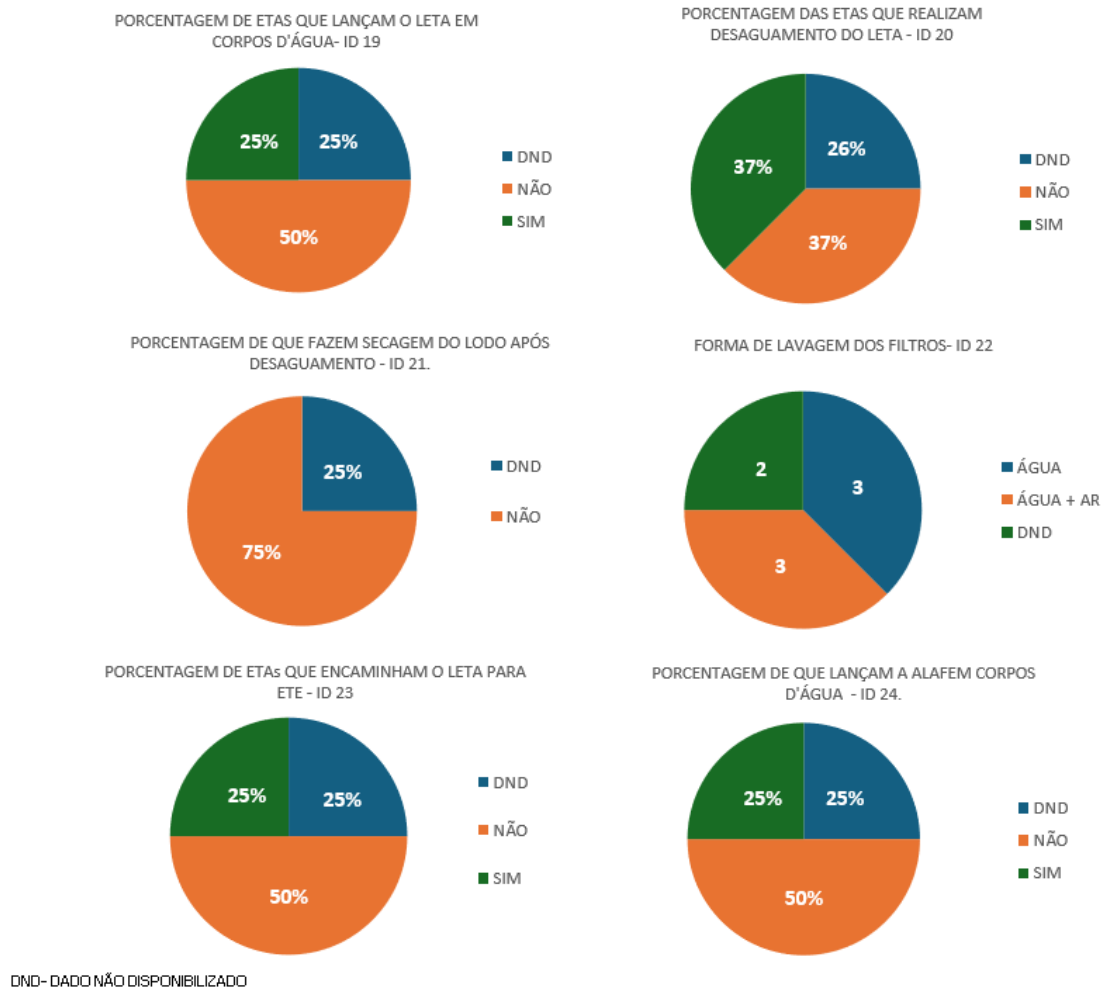
A destinação dos resíduos provenientes do tratamento de água (LETA e ALAF) constitui a quarta categoria de indicadores, conforme detalhado no gráfico da Figura 21. A análise do indicador ID 19 demonstra que 25% das ETAs persistem na prática de lançar o LETA em corpos d'água. Em contrapartida, 50% das estações têm adotado outras formas de destinação, dentre elas o encaminhamento para Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

Em relação ao indicador de desaguamento do LETA, a avaliação apresenta uma distribuição uniforme entre as ETAs, com 37% adotando a prática e o mesmo percentual não a utilizando. Quanto à secagem do lodo subsequente ao desaguamento (ID 21), verifica-se que a maioria das ETAs visitadas (75%) não implementa esse processo.

A metodologia de lavagem dos filtros é um aspecto significativo a ser considerado no processo de destinação de resíduos. Este processo pode envolver o uso exclusivo de água ou a combinação de água e ar, conforme demonstrado no ID 22. Analisando este indicador, percebe-se uma equivalência, com três ETAs utilizando unicamente água para a lavagem e outras três empregando a combinação ar-água, as demais não disponibilizaram o dado.

Ao analisar as ETAs que direcionam o lodo para ETE (ID 23), observa-se que uma pequena parcela, correspondente a 25% das estações da UGRHI 13, adota essa prática como destinação final do LETA. No que concerne ao lançamento de Água de Lavagem de Filtros (ALAF) em corpos d'água (ID 24), observa-se que 25% das ETAs empregam essa metodologia, ao passo que 50% adotam outras alternativas de destinação.

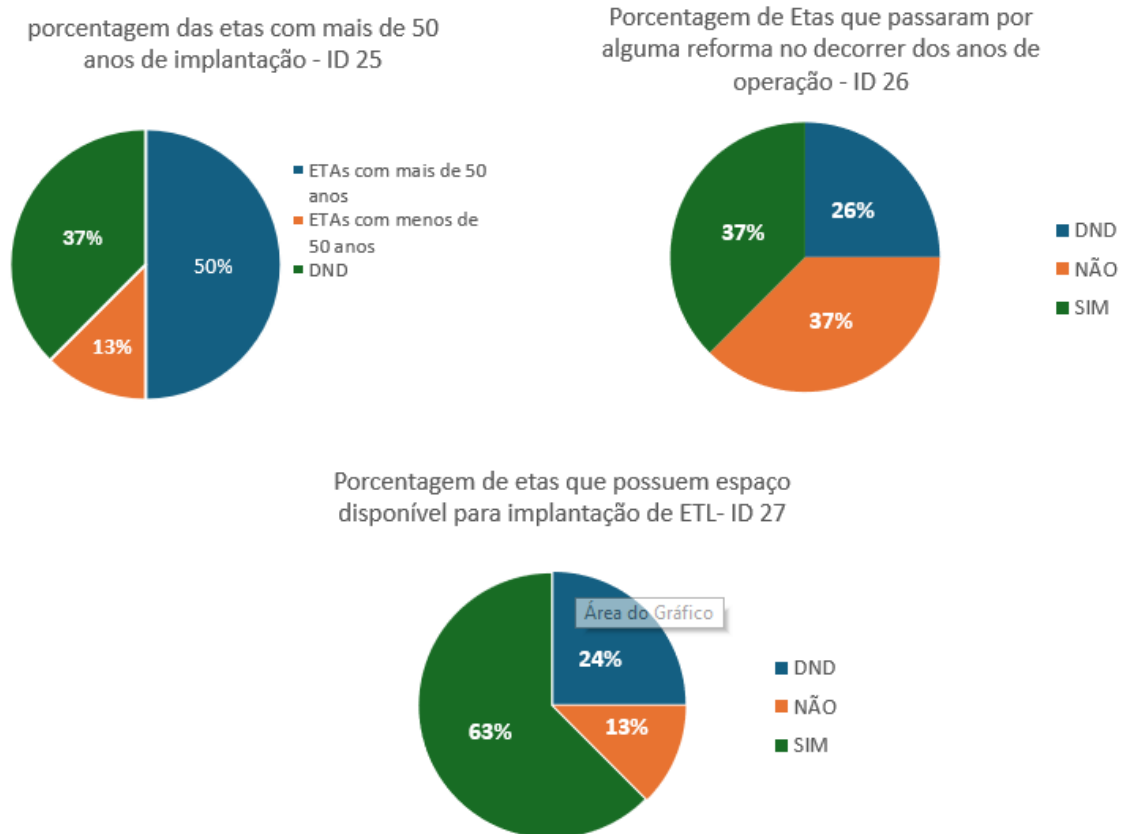
Figura 21 - Gráfico do grupo de indicadores destinação do resíduo (ID 19 ao ID 24)



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A quinta categoria de indicadores dedica-se à análise da infraestrutura das ETAs, considerando três pontos principais: o período de implantação das estações de tratamento de água, a realização de reformas ao longo dos anos de operação e a disponibilidade de espaço físico para implementação de uma Estação de Tratamento de Lodo (ETL). O gráfico da Figura 22 representa os indicadores (ID 25 a ID 27).

Figura 116822 - Gráfico do grupo de indicadores infraestrutura (ID 25 ao ID 27)



\* DND- DADO NÃO DISPONIBILIZADO

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

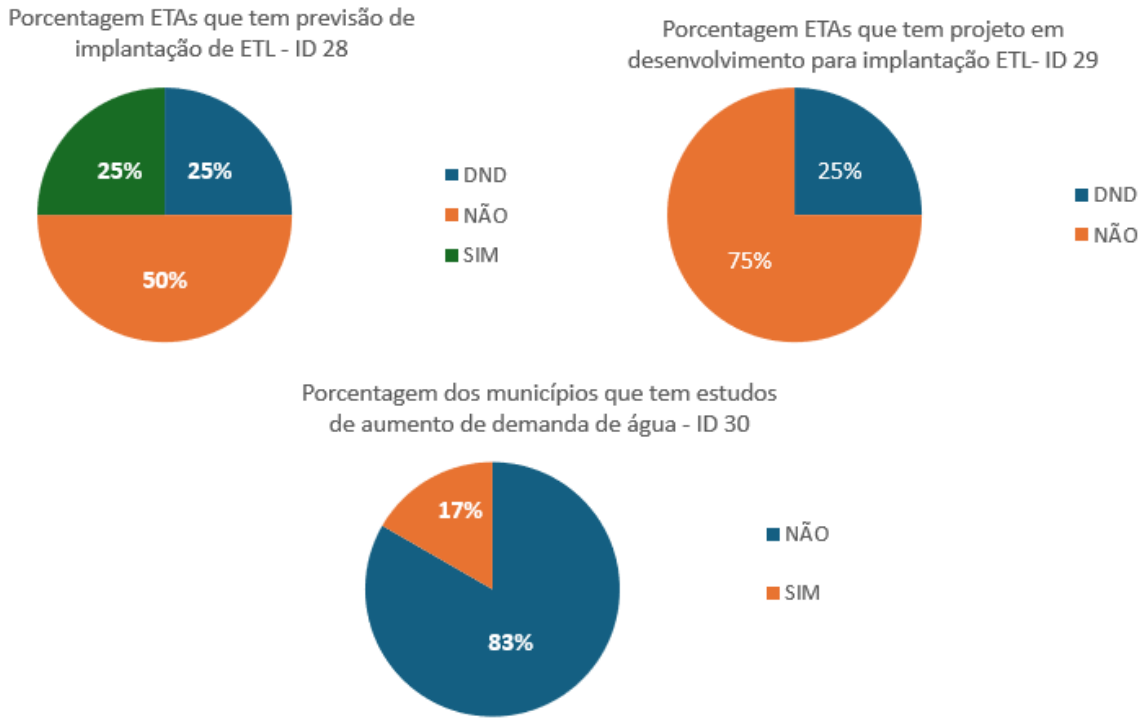
O ID 25 evidencia que metade das estações de tratamento analisadas já ultrapassou 50 anos de operação, enquanto uma pequena parcela (13%) opera há menos de 50 anos. Esse cenário aponta para um possível envelhecimento ou obsolescência dos sistemas de tratamento de água. Analisando o indicador ID 26, corrobora para essa interpretação, demonstrando que apenas 37% das ETAs passaram por alguma reforma ou benfeitoria ao longo de sua vida útil.

Quanto à disponibilidade de espaço físico para a implantação de uma Estação de Tratamento de Lodo, o ID 27 demonstra que a maioria das ETAs (63%) dispõem de espaço físico, enquanto 13% não dispõem de área.

A sexta categoria de indicadores dedica-se à análise do planejamento das ETAs, considerando os seguintes aspectos: a existência de previsão ou de projetos em desenvolvimento para a implantação de uma ETL, e a quantidade

de municípios que possuem estudos de aumento de demanda de água. O gráfico da Figura 23 ilustra os indicadores (ID 28 a ID 30).

Figura 23 - Gráfico do grupo de indicadores planejamento (ID 28 ao ID 30)



\* DND- DADO NÃO DISPONIBILIZADO

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise do ID 28 revela que apenas 25% das ETAs têm previsão de implantar uma Estação de Tratamento de Lodo (ETL), enquanto 50% não têm. Este cenário se repete no ID 29, que analisa as ETAs com projetos em desenvolvimento, mostrando que a maioria (75%) não possui nenhum projeto em desenvolvimento. Em relação aos municípios que possuem estudos de aumento de demanda de água, o indicador ID 30 demonstra que apenas 17% dos municípios têm estudos sobre previsão de aumento de demanda de água, enquanto 83% não possuem.

#### 4.4. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA NA UGRHI 13 – TIETÊ JACARÉ

Utilizando a série histórica do IQA no período de dez anos (2013-2023), foi aplicado o modelo estatístico de análise preditiva de regressão mista, tendo como objetivo verificar a existência de uma tendência no IQA, considerando os pontos de monitoramento por período. O Quadro 9 apresenta as equações obtidas através da aplicação do modelo e erros relativos para cada ponto de monitoramento, e o Gráfico da Figura 23 mostra a evolução dos valores de IQA para diferentes pontos da UGRHI 13 ao longo de 10 anos (2013-2023).

Quadro 674 - Análise das equações e erros relativos do modelo de regressão misto em cada ponto de monitoramento

Ponto	Equação	Erro Relativo
JCGU 03200	$IQA_{JCGU03200} = 339.47 + (-0.1382 \times \text{ano})$	6.49%
JCGU 03400	$IQA_{JCGU03400} = 343.98 + (-0.1382 \times \text{ano})$	3.71%
JSGU 03900	$IQA_{JSGU03900} = 337.58 + (-0.1382 \times \text{ano})$	3.46%
JPEP 03500	$IQA_{JPEP03500} = 348.59 + (-0.1382 \times \text{ano})$	4.41%
JPEP 03600	$IQA_{JPEP03600} = 350.75 + (-0.1382 \times \text{ano})$	4.04%
LENS 02500	$IQA_{LENS02500} = 344.17 + (-0.1382 \times \text{ano})$	3.67%
LENS 03950	$IQA_{LENS03950} = 340.47 + (-0.1382 \times \text{ano})$	6.31%
MONJ 04400	$IQA_{MONJ04400} = 311.60 + (-0.1382 \times \text{ano})$	11.56%
RGRA 02990	$IQA_{RGRA02990} = 315.30 + (-0.1382 \times \text{ano})$	7.31%
TIET 02500	$IQA_{TIET02500} = 345.34 + (-0.1382 \times \text{ano})$	5.54%

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

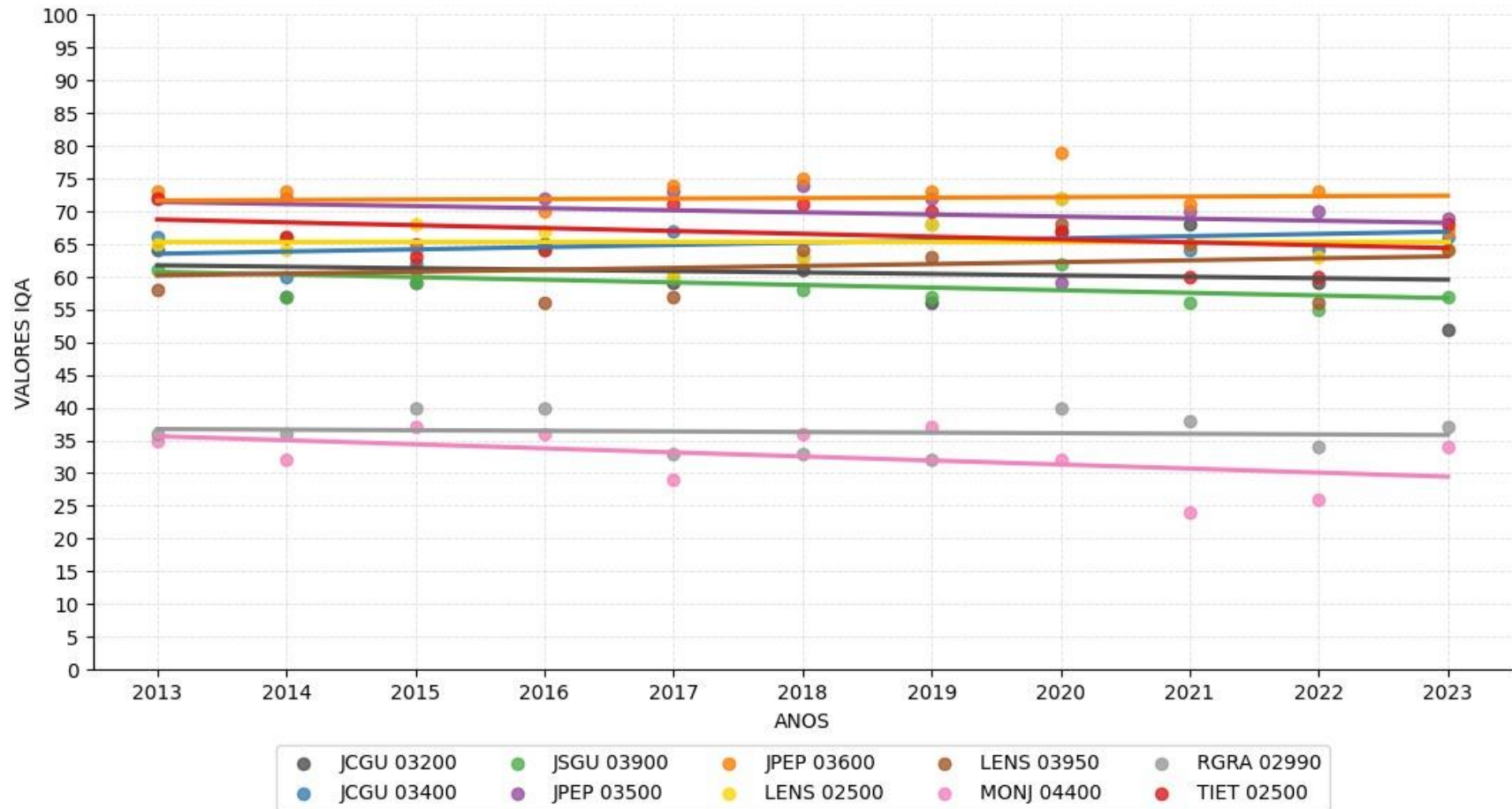
Ao analisar as equações geradas pelo modelo, percebe-se que todos os pontos têm um coeficiente angular negativo, indicando uma redução média de 0,1382 pontos no IQA por ano. A análise dos interceptos variáveis evidencia que cada ponto de monitoramento tem seu valor inicial específico variando entre 311,60 e 350,75. Os erros relativos do modelo variam de 3,46% no ponto (JCGU 03900) a 11,56% no ponto (MONJ 04400). Embora erros entre 3,46% e 6,49% evidenciem um bom ajuste do modelo, os pontos RGRA02990 (7,31%) e MONJ04400 (11,56%) possuem erros mais elevados.

O gráfico da Figura 24 ilustra que o ponto MONJ04400 (linha rosa) possui uma maior dispersão e variabilidade, sugerindo a presença de outliers ou padrões não lineares. Essa característica pode estar associada ao fato de este ponto ser o receptor de esgoto do município de São Carlos. De forma similar, o ponto RGRA 02990, que também apresenta erro relativo superior (7,31%) em

relação aos demais pontos da UGRHI, provavelmente está associado ao fato de ser o corpo receptor do esgoto do município de Bauru.

O gráfico da Figura 24 apresenta os 10 pontos analisados, distribuídos da seguinte forma: três pontos de monitoramento no rio Jacaré Guaçu (JCGU 03200; JCGU 03400 e JCGU 03900), dois pontos no rio Jacaré Pepira (JPEP 03500 e JPEP 03600), dois pontos no Rio Lençóis (LENS 02500 e LENS 03950), um ponto no rio Monjolinho (MONJ 04400), um no rio Ribeirão Grande (RGRA 02990) e um no rio Tietê em Barra Bonita (TIET 02500). O gráfico apresenta a variação dos valores do IQA ao longo de uma década (2013-2023) e ilustra um panorama da presente situação da bacia hidrográfica e de seus mananciais.

Figura 124334 - Gráfico dos valores de IQA por ponto de monitoramento entre (2013-2023) da UGRHI 13



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Ao analisar os pontos de monitoramento da Bacia Hidrográfica em relação às faixas de classificação do IQA, percebe-se que dois pontos apresentam valores de IQA dentro da faixa de classificação boa, seis pontos se enquadram na faixa de classificação regular e dois pontos que se enquadram na faixa de classificação ruim. Este cenário mostra que 8 dos 10 mananciais têm mantido a qualidade da água estável ao longo deste período, apresentando apenas pequenas oscilações anuais que já são previstas devido à sazonalidade, volume de chuvas, períodos de estiagem, dentre outros fatores.

O ponto JPEP 03600, localizado no Rio Jacaré Pepira, apresenta os melhores resultados de IQA, mantendo-se constantes entre 72-78 pontos, enquadrando-se na faixa de classificação boa adotada pela CETESB. O rio Tietê (TIET02500), localizado em Barra Bonita, apresenta valores estáveis de IQA variando entre 68-72 pontos, enquadrando-se na faixa de classificação Boa. Os três pontos localizados no Rio Jacaré Guaçu (JCGU03200, JCGU034000 e JCGU03900) apresentam valores de IQA entre 65-57 pontos, o que indica que o manancial se enquadra na classificação boa da CETESB. Diante deste cenário, percebe-se que os principais rios da UGRHI 13 estão enquadrados na faixa de classificação boa

O rio Monjolinho apresenta uma tendência preocupante de deterioração, apresentando um declínio de 35 para 25 pontos no IQA, enquadrando-se na faixa ruim. Essa desconformidade está relacionada ao recebimento do esgoto do município de São Carlos, que, apesar de São Carlos tratar mais de 90% do esgoto desde a entrada em operação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em 2012, tendo reduzido a carga remanescente que era de 46% em 2011, infelizmente, as melhorias dos valores de IQA neste ponto ainda não foram alcançadas. O que ressalta a necessidade de aprimoramento e expansão da infraestrutura, visando a universalização dos serviços de saneamento e a garantia da qualidade da água, estabelecidos pela Agenda 21 e o novo Marco Legal do Saneamento.

De forma similar, o rio Ribeirão Grande também possui valores de IQA em desconformidade, pois é o receptor do esgoto do Município de Bauru logo após o encontro com o Rio Bauru. A ausência de uma estação de tratamento de esgoto em Bauru, considerado o maior município da UGRHI 13, é um fato extremamente preocupante. Considerando que o prazo estabelecido para o

cumprimento das metas de universalização do saneamento, que prevê 99% da população atendida com água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto até 2033, está se esgotando, a urgência em avançar com a implantação de uma estação de tratamento de esgoto em Bauru é crítica.

A precariedade desses rios serve como um alerta para o cumprimento rigoroso dos prazos e destinação dos investimentos essenciais, garantindo o alcance das metas estabelecidas pelo novo marco legal do Saneamento, garantindo a saúde pública e a sustentabilidade ambiental.

Os pontos do Rio Lençóis (LENS 02500 e LENS 03950) também apresentam valores de IQA dentro da faixa de classificação boa. Em relação ao ponto LENS 02500, localizado no ponto de captação da ETA de Lençóis, este ponto também avalia a qualidade da água para fins de abastecimento público. Vale enfatizar que a UGRHI 13 possui 16 pontos de monitoramento distribuídos em toda a sua extensão, mas somente este ponto faz a análise da água para fins de abastecimento público.

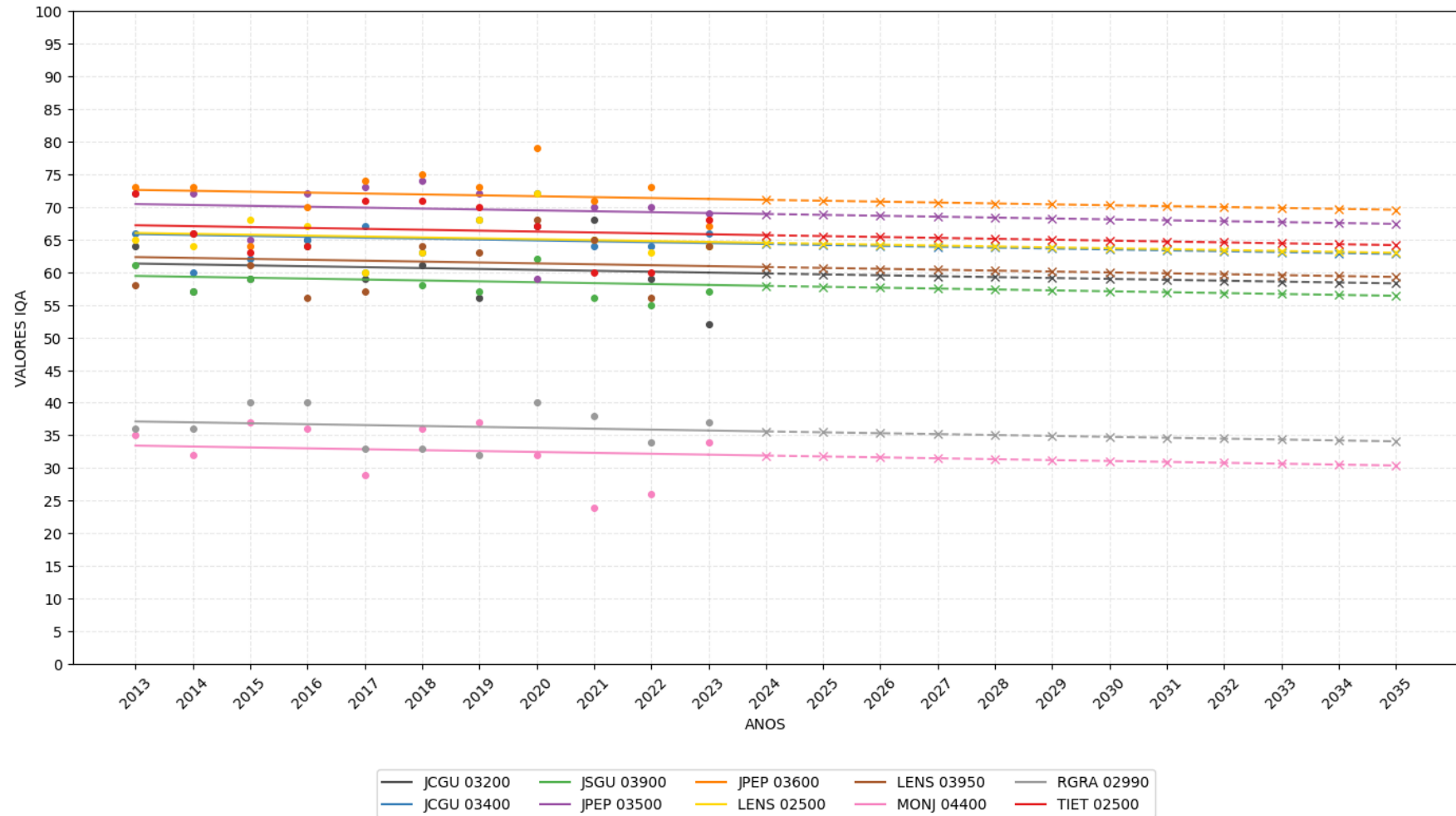
Diante disto, uma questão crítica se impõe: é plausível que dentro da UGRHI 13, que possui 16 pontos de monitoramento, dos quais oito foram implantados no período de 2007 a 2014, somente um deles, o que representa aproximadamente 6%, seja voltado para a análise da água para consumo humano? Esse desequilíbrio é mais preocupante se levarmos em consideração o fato de que, em 2023, a qualidade da água para abastecimento público foi considerada apenas regular, oscilando entre 37 e 51 pontos conforme o índice de qualidade das águas brutas para fins de abastecimento público (IAP).

Este cenário evidencia que a maioria dos pontos de monitoramento da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré concentra-se na avaliação da qualidade da água a jusante, no corpo receptor. Essa insuficiência de pontos de monitoramento a montante pode comprometer a segurança hídrica e a saúde pública na região.

A fim de complementar a análise da qualidade da água na UGRHI 13 e diante dos aspectos pontuados acima, torna-se crucial visualizar as tendências futuras. Desta forma, foi feita uma projeção dos valores de IQA, utilizando o método de Regressão Mista para todos os 10 pontos de monitoramento selecionados para o período de 2024 a 2035. O gráfico da Figura 25 apresenta

os valores do IQA baseados na série histórica (linha contínua) e a projeção destes valores para o período de 2024 a 2035 (linha tracejada).

Figura 25 - Gráfico da evolução histórica (2013-2023) e projeção do IQA (2024-2035) por ponto de monitoramento



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Ao analisar as projeções apresentadas no gráfico 10, elas indicam um cenário de degradação progressiva da qualidade da água na UGRHI Tietê-Jacaré. A projeção feita para 2024-2035 apresenta tendências de declínio contínuo para a maior parte dos pontos de monitoramento, com estabilização em patamares inferiores aos atuais. Os baixos valores dos erros relativos (0,59% a 1,33%) indicam um bom ajuste do modelo empregado para análise. O ponto localizado no Rio Monjolinho é o que apresenta erro relativo maior, devido à sua variabilidade da qualidade da água ao longo dos anos relacionada à recepção do esgoto doméstico.

Essa degradação dos mananciais sugere a necessidade de intervenções efetivas, abordagens integradas de gestão que estejam fundamentadas em ações preditivas de forma a garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos para as próximas décadas.

#### 4.5. ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

Foram elaborados 3 (três) cenários para cada um dos resíduos oriundos do tratamento de água, LETA e ALAF. Foi considerado um cenário realista, um otimista e um pessimista para cada um conforme apresentados abaixo.

##### 4.5.1. Cenários realista para o LETA

A elaboração do cenário realista foi baseada em dados da literatura, crescimento populacional e universalização, tendo como base a porcentagem de atendimento da população com água tratada. Através destes dados, foi possível estimar o volume de LETA em relação ao volume de água tratada para cada ETA estudada. O Quadro 10 mostra o volume de LETA gerado baseado em dados da literatura e universalização.

Quadro 738 - Estimativa de volume de LETA baseado em dados da literatura e universalização

Estimativa de volume de LETA									
Identificação				Geração de LETA baseado em índices da literatura					
Municípios	ETA	Crescimento populacional		Volume de água tratada	Universalização - ID 01			Volume de resíduos	
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. água trat. universalizado 2024	Vol. água trat. universalizado 2035	Leta adotado 2,5% (2024)	Leta adotado 2,5% (2035)
				formulário	SNIS	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	846	874
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	200	207
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	164	158
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	181	175
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	372	451
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	437	480
5	ETA 7	265294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	1.102	1.140
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA

\*DND- Dado não disponibilizado

IA- Impossibilidade de aplicação

ID - 01 - Porcentagem da população atendida com água tratada

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Através da aplicação do formulário, foi levantado o volume de água tratada para cada estação de tratamento de água no ano de 2024. Analisando o ID-01, que trata sobre a universalização, percebe-se que apenas um município atende à meta do novo marco legal para 2033, no que diz respeito à população atendida com água tratada. Baseado neste dado, foi recalculado o volume de água tratada para cada ETA que não tinha atendimento de 100%, para tornar este dado o mais próximo do cenário futuro esperado com a universalização.

Adotando os índices da literatura que fazem referência à produção do volume de lodo em relação ao volume de água tratada pela ETA, para o cenário realista, optou-se por adotar o valor de 2,5% para a produção de lodo em relação ao volume de água tratada. O motivo da escolha desse valor se deu por ser a metade do valor máximo encontrado na literatura, cerca de 5% da produção diária de água da ETA, conforme Andreoli (2001), citado por Oliveira *et al.* (2016).

Analisando as ETAs 3 e 4, percebe-se uma variação do volume de água tratada durante a semana em relação aos fins de semana e feriados. Essa variação de volume ocorre porque o município é considerado turístico e o aumento do consumo de água ocorre nestes períodos. Portanto, optou-se por calcular os dois cenários para este caso. Quanto à universalização, apenas um município declara atendimento 100% em relação ao atendimento da maioria, que é acima de 95%. Destaca-se o município 6, que possui atendimento bem inferior aos demais da UGRHI 13, apenas 83,27%.

O volume de água tratada para o ano de 2024, considerando a universalização, ou seja, atendimento 100% da população, variou de 6.541 m<sup>3</sup>/dia a 44.064 m<sup>3</sup>/dia. Para 2035, com o aumento populacional e a manutenção da universalização, essa variação foi de 6.327 m<sup>3</sup>/dia a 45.599 m<sup>3</sup>/dia. Esses impactam diretamente a produção de lodo, calculada como 2,5% do volume de água tratada por ETA.

Desta forma, o volume de resíduos para o ano de 2024 variou de 164 m<sup>3</sup>/dia a 1.102 m<sup>3</sup>/dia, uma variação aproximada de 938 m<sup>3</sup>/dia. Para 2035, a variação foi de 158 m<sup>3</sup>/dia a 1.140 m<sup>3</sup>/dia. A redução de volume do resíduo para as ETAs 3 e 4 (durante a semana) do município 2 é atribuída a uma projeção populacional decrescente.

Em relação à estação de tratamento de água (ETA) 8, não foram disponibilizados dados pela concessionária. Conforme o Quadro 7, a sigla 'DND' indica essa indisponibilidade, e 'IA' representa a impossibilidade de aplicação da análise devido à ausência de dados.

Como forma de quantificar a influência dos dados qualitativos levantados na fase de diagnóstico para o cálculo final do volume de lodo, foi utilizado o método de análise multicritério. Na aplicação, primeiramente foram selecionados indicadores mais relevantes, em seguida foram atribuídos valores para cada um destes de forma que possibilitasse a sua avaliação numérica, também se considerou que todos os indicadores selecionados terão o mesmo peso, não havendo ponderação entre estes. O Quadro 11 apresenta os critérios adotados para cada indicador.

Quadro 1234 - Critérios adotados para os indicadores e índice baseados na análise multicritério.

Critérios estabelecidos para os indicadores baseados na análise multicritério			
Indicador	Cód. Ind.	Val. Adot.	Justificativa
Pontos de captação protegidos por vegetação nativa	ID 06	SIM- 1,00 NÃO- 1,50	Se protegido por vegetação nativa não altera a qualidade da água (1,0); Não protegido (1,5) piora a qualidade da água.
Índice de qualidade da água	IQA	ÓTIMO- 0,50 BOM - 0,80 REGULAR- 1,00 RUIM - 1,30 PÉSSIMO - 1,50	Utilizou a classificação da CETESB como base
ETAs que lançam o lodo em corpos d'água	ID 19	SIM- 1,50 NÃO - 1,00	Se a ETA lança o LETA em corpos d'água tem se piora na qualidade da água (1,5); ETA não lança o LETA, mantém a qualidade da água (1,0).
ETAs que realizam desaguamento do lodo	ID 20	SIM- 0,80 NÃO- 1,00	ETA realiza desaguamento do LETA (0,8), possui uma gestão de resíduo mais adequada com redução de volume; Não realiza recebe (1,0).
ETAs que fazem secagem do lodo após desaguamento	ID 21	SIM- 0,20 NÃO- 1,00	ETA realiza secagem LETA (0,2), pois faz uma gestão de resíduo mais adequada (nível maior que desaguamento), não realiza atribuiu-se (1,0).
ETAs que encaminham o lodo para ETE.	ID 23	SIM- 0,80 NÃO- 1,00	ETAs que encaminham o LETA para ETE (0,8), como alternativa a redução de impactos ambientais em relação ao lançamento; ETAs que não encaminham recebem 1,0.
ETAs com mais de 50 anos que passaram por alguma reforma	ID 25+26	SIM- 0,80 NÃO- 1,20	ETAs com mais de 50 anos que passaram por reforma atribuiu-se 0,8 como forma de prolongamento da vida útil, eficiência, conformidade, segurança, práticas de gestão; ETAs que não passaram por reforma (1,2).
ETAs que possuem área disponível	ID 27	SIM- 1,00 NÃO- 1,50	ETAs que possuem área disponível atribuiu-se 1,0 como possibilidade de adequações, implantação de novas tecnologias e aumento de demanda; para as ETAs que não tem área disponível receberam 1,5.
ETAs que tem previsão de implantação de estação de tratamento de lodo (ETL)	ID 28	SIM- 0,80 NÃO- 1,20	As ETAs que relataram ter previsão de implantação de ETL atribuiu-se 0,8, como melhoria na gestão de resíduos e redução de impactos ambientais; Para as ETAs que não tinham nenhuma previsão receberam valor 1,2.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Posteriormente, o produto dos valores atribuídos para cada um dos Ids gerou um Score de Análise Preditiva (SAP) que representa numericamente a influência destes dados qualitativos na geração de resíduos do tratamento de água.

Em continuidade ao trabalho, o SAP será aplicado no cálculo do volume de resíduo final universalizado. Após o cálculo final do volume, foi aplicado o método de matriz de estratificação por intervalo, baseando-se no valor do SAP calculado, tendo como referência a matriz de classificação de cenário, constante no rodapé da Tabela 11, que apresenta o cenário atual para geração de LETA para cada ETA estudada.

Tabela 2763 - Cenário realista para estimativa do volume de LETA

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																								
Identificação				Análise preditiva multicritério para LETA																				
				Geração de lodo					Manancial				Tratamento lodo - gestão				Infraestrutura		Planejamento		Score de análise preditiva (SAP)	Vol. final LETA universalizado (2035)	Análise do cenário	
MUNIC.	ETAS	CRESCIMENTO POPULACIONAL		Volume de água tratada	Universalização - ID 01		Vol. de resíduos		Proteção manancial			Lanç. Em corpo d'água	Enc. lodo para ETE	Desaguamento		Secagem		ETAS antigas que foram reformadas	Área disponível	Previsão ETL/ projeto				
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)		ID 01 (%)	VOL. ÁGUA TRAT. ATEND. POP. (100%) 2024	VOL. ÁGUA TRAT. ATEND. POP (100%) 2035	LETA ADOT. 2,5% (2024)	LETA ADOT. 2,5% (2035)	ID 06	IQA (2024)			IQA (2035)	ID 19	ID 23	ID 20				Vol. LETA desaguado (m³) (2024)	ID 21 (2024)	Estimativa área para secagem leta (m²) (2024)	ID 25+ID 26
				FORMULÁRIO (m³/dia)	SNIS	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	SIM-1,0 NÃO-1,5 *DND	ÓTIMO-0,5 BOM-0,8 REGULAR-1,0 RUIM-1,3 PÉSSIMO-1,5	SIM-1,5 NÃO-1,0 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,0 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,0 *DND	ST-20%	SIM-0,2 NÃO-1,0 *DND	HL=0,50m	SIM-0,8 NÃO-1,2 *DND	SIM-1,0 NÃO-1,5 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,2 *DND	1,15	(m³)	Baseado na matriz de classificação de cenário	
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	846	874	1,50	IA	IA	1,0	1,00	0,80	84,63	1,00	169	0,8	1,00	1,2	1,15	1006,88	REGULAR
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	200	207	1,00	IA	IA	1,50	1,00	1,00	20,04	1,00	40	1,20	1,00	0,80	1,44	298,09	RUIM
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	164	158	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	16,35	1,00	33	1,20	1,00	1,2	1,15	182,21	REGULAR
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	181	175	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	18,11	1,00	36	1,20	1,00	1,2	1,15	201,83	REGULAR
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	372	451	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	37,15	*DND	74	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	437	480	1,50	0,80	0,80	1,50	1,00	1,00	43,73	1,00	87	0,8	1,00	0,80	1,44	691,10	RUIM
5	ETA 7	265294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	1.102	1.140	1,5	IA	IA	1,00	0,8	1,00	110,16	1,00	220	0,8	1,5	1,2	1,73	1969,87	RUIM
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- Dado não disponibilizado  
 IA- Impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 19- Porcentagem de etas que lançam o lodo em corpos d'água  
 ID 20- Porcentagem das etas que realizam desaguamento do lodo  
 ID 21- Porcentagem de etas que fazem secagem do lodo após desaguamento  
 ID 23- Porcentagem de etas que encaminham o lodo para ete  
 ID 25- porcentagem de etas com mais de 50 anos de implantação  
 ID 26- porcentagem das etas que passaram por alguma reforma no decorrer dos anos de operação  
 ID 27- Porcentagem de etas que possuem espaço disponível para implantação de uma estação de tratamento de lodo (etl)  
 ID 28- Porcentagem das etas que tem previsão de implantação de estação de tratamento de lodo (etl)

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO CENÁRIO	
Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA < 100
BOM	51 < IQA < 79
REGULAR	36 < IQA < 51
RUIM	19 < IQA < 36
PÉSSIMA	IQA < 19

Ótimo- 0,5  
 Bom-0,8  
 Regular- 1,0  
 Ruim- 1,3  
 Péssimo- 1,5

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para melhor compreensão dos dados constantes na Tabela 11, os dados foram divididos em subcategorias: manancial, tratamento, lodo-gestão, infraestrutura e planejamento. Para cada uma destas categorias foram selecionados IDs para avaliação.

Na categoria de análise do manancial, os critérios adotados foram: o ID 06, que aborda a proteção dos pontos de captação por vegetação nativa, o índice de qualidade da água (IQA), e o ID 23, ETAs que encaminham o LETA para a estação de tratamento de esgoto (ETE). Os critérios utilizados para determinação dos valores atribuídos a cada ID constam no Quadro 7.

Avaliando o ID 06, percebe-se que 50% dos pontos de captação encontram-se protegidos por vegetação nativa, enquanto 25% estão desprotegidos. Além disso, há duas ETAs que não disponibilizaram estes (25%). Vale salientar que a proteção do ponto de captação por vegetação nativa apenas mantém a qualidade da água do manancial.

A análise da coluna do IQA mostra que, dos 10 pontos de monitoramento na UGRHI 13, apenas um está ligado a uma das ETAs analisadas (ETA 6). É somente nesse ponto que a qualidade da água para abastecimento público é monitorada. Essa situação destaca que a maior parte do monitoramento da bacia hidrográfica se concentra nos corpos receptores de esgoto doméstico. A qualidade da água neste ponto para o ano de 2024 e 2035 é classificada como boa conforme modelo de regressão misto aplicado. Entretanto, o modelo de regressão aplicado indica uma queda na qualidade da água ao longo dos anos. Isso reflete também a necessidade de um maior controle da qualidade da água bruta e dos mananciais e não apenas dos corpos receptores onde são lançados os efluentes tratados.

Ao analisar o ID 19, que se refere às estações de tratamento de água que ainda lançam o lodo nos corpos d'água, observa-se que duas, ou seja, 25% do total, ainda mantêm essa prática. Em contraste, 50% das ETAs que já não fazem adotam mais essa prática.

Para o ID 20, foi estimada a redução no volume de resíduo da seguinte forma: primeiramente, foi calculado a massa de lodo para o teor de sólidos de 2% e utilizando o volume de LETA calculado para o ano de 2024 universalizado. Em seguida, considerando que o teor de sólidos totais após desaguamento do lodo (ST) é de 20%, obteve-se o novo volume de LETA pós desaguamento. O

que em termos percentuais, gerou uma redução de aproximadamente 90% do volume, mostrando a eficácia do processo de desaguamento.

No ID 21, foi estimada área de secagem para cada ETA estudada, considerando um sistema natural, com altura para um leito de secagem de 50 cm. O dado revela que cinco das oito ETAs necessitam de uma área para secagem inferior a 100m<sup>2</sup>. A maior área estimada é de aproximadamente 220m<sup>2</sup>, o que representa um pouco mais que o dobro da maioria das necessidades identificadas.

Ao analisar a estimativa de área necessária para leito de secagem em conjunto com o ID 27, que apresenta as ETAs que possuem área disponível, percebe-se que a grande maioria das estações está apta a implementar essa estrutura, pois a maior parte das áreas estimadas é relativamente pequena, em relação a área das ETAs, conforme apresentado no Quadro 12 que apresenta a área das estações de tratamento de água (ETAs) objetos desta pesquisa. Estas áreas foram estimadas através do Google Earth.

Quadro 1587 - Áreas das Estações de Tratamento de Água

ÁREA DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs)			
ETAs	Área ETA (m <sup>2</sup> )	Área Estimada para secagem LETA (m <sup>2</sup> )	Porcentagem da área estimada para secagem do lodo em relação a área da ETA
ETA 1	2.376,16	169	7,11
ETA 2	948,78	40	4,22
ETA 3 e 4	5.835,70	33	0,57
ETA 5	5.361,13	36	0,67
ETA 6	4.862,99	74	1,52
ETA 7	3.646,38	87	2,39
ETA 8	1.103,14	220	19,94

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Das 8 ETAs avaliadas, apenas a que não tem disponibilidade de área é a que necessitaria de mais espaço para implantação desta técnica. Esse dado indica uma viabilidade de aprimoramento para a gestão deste resíduo nestas estações. Como alternativa para o tratamento do lodo seria o emprego de tratamento mecanizado de desaguamento ou secagem, já que estes sistemas necessitam de uma área bem menor em relação aos sistemas naturais.

A exceção identificada (ETA 7) é a única que encaminha o lodo da estação de tratamento de água (LETA) para a estação de tratamento de esgoto (ETE). Isso significa que a indisponibilidade de área para implantação de leito de secagem é mitigada por uma prática alternativa existente.

Com base na análise conjunta do ID 28 (implantação de Estação de Tratamento de Lodo - ETL) e do ID 19 (ETAs que lançam lodo em corpos d'água), observa-se que as ETAs 2 e 6, que anteriormente descartavam o lodo no corpo hídrico, possuem previsão/projeto de implantação de uma ETL. Esse dado reflete uma melhora na qualidade da água da bacia hidrográfica e que essas estações estão se mobilizando para práticas de gestão de resíduos mais sustentáveis.

Ao analisar o ID 25+26, que se refere a estações de tratamento de água que já passaram por alguma reforma, percebe-se uma equivalência, na qual três dessas estações já passaram por alguma reforma em contraste a outras três que não sofreram intervenção. Esse dado enfatiza que ETAs que foram reformadas podem apresentar maior eficiência operacional, maior conformidade ambiental, aumento da capacidade operacional, dentre outros.

Em contrapartida, ETAs que não foram reformadas no decorrer dos anos de operação podem apresentar maior consumo de energia e de insumos, dificuldade de atender a padrões de qualidade e ambientais, dentre outros.

Os resultados obtidos com a aplicação do Score de Análise Preditiva (SAP) para estimativa do volume final de LETA para o ano de 2035 mostraram variações significativas entre as ETAs, conforme exposto abaixo para um cenário realista:

- ETAs 1, 3 e 4: Apresentaram um aumento próximo a 20% no volume de LETA estimado para 2035 em comparação às suas projeções base.
- ETA 2: Houve um aumento de volume de LETA de aproximadamente 50%.

- ETAs 6 e 7: Foi evidenciado o maior aumento no volume de resíduo, que superou os 50%.

A aplicação da matriz de estratificação por intervalos no rodapé do Quadro 8, que utiliza os valores do Score de Análise Preditiva (SAP), fornece uma classificação do desempenho das ETAs. Essa metodologia categoriza a situação de cada ETA com base no seu "grau de impacto" qualitativo, conforme o SAP. Os resultados obtidos são os seguintes:

- Nenhuma ETA obteve Score suficiente para se enquadrar nos cenários Ótimo ou Bom, o que indica que nenhuma estação está operando com o potencial ideal em termos de gestão de resíduos e impactos;
  - As ETAs 1, 3, 4 e 7 enquadram-se no cenário Regular, o que também não é ideal em termos de gestão de resíduos;
  - As ETAs 2, 6 foram classificadas em um cenário Ruim, o que indica uma mudança de práticas de gestão de resíduos emergenciais.
  - As ETAs 5 e 8, não foi possível aplicar os dados.

Os dados revelam um cenário preocupante, com muito a ser feito: 25% das ETAs não disponibilizaram os dados, 25% das ETAs analisadas ainda lançam o lodo diretamente no corpo d'água. Apesar de práticas simples como o desaguamento poderem reduzir o volume de resíduo em até 80%, apenas 50% das estações estudadas as adotam. Além disso, nenhuma das estações de tratamento de água analisadas realiza a secagem do lodo, mesmo com a necessidade de áreas estimadas inferiores a 100m<sup>2</sup>.

Tendo como base o cenário realista proposto para o ano de 2024, foram criados mais dois cenários, um cenário otimista e um cenário pessimista. Ambos os cenários adotaram índices da literatura diferentes para estimativa de volume de resíduos e atribuição de diferentes valores para os IDs, levando em consideração a redução e aumento do volume de resíduo, respectivamente.

#### **4.5.2. Cenário otimista para o LETA**

O cenário futuro otimista, conforme citado anteriormente, foi elaborado baseando no cenário realista conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 3259 - Cenário otimista para estimativa do volume de LETA

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																								
Identificação				Análise preditiva multicritério para LETA																				
				Geração de lodo					Manancial				Tratamento lodo - gestão				Infraestrutura		Planejamento		Score de análise preditiva (SAP)	Vol.final LETA universalizado (2035) (m³)	Análise do cenário	
MUNIC.	ETAS	CRESCIMENTO POPULACIONAL		Volume de água tratada	Universalização - ID 01			Vol. de resíduos		Proteção manancial			Laç. Em corpo d'água	Encl.do para ETE	Desaguamento		Secagem		ETAS com mais de 50 anos que foram reformadas	Área disponível				Previsão ETL/ projeto
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. Água trat. Atend. pop. (100%) 2024	Vol. Água trat. Atend. pop. (100%) 2035	LETA adot. 1,5% (2024)	LETA adot. 1,5% (2035)	ID 06	IQA (2024)	IQA (2035)	ID19	ID23	ID 20	Vol. LETA desaguado (m³) (2035)	ID 21 (2024)	Estimativa área para secagem leta (m²) (2035)	ID 25+ID 26	ID 27	ID 28			
				FORMULÁRIO (m³/dia)	SNIS	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	SIM-1,0 NÃO- 1,5 *DND	ÓTIMO- 0,5 BOM - 0,8 REGULAR- 1,0 RUIM - 1,3 PÉSSIMO - 1,5	SIM- 1,5 NÃO- 1,0 *DND	SIM- 0,8 NÃO- 1,0 *DND	SIM- 0,8 NÃO- 1,0 *DND	ST- 20%	SIM- 0,2 NÃO- 1,0 *DND	HL= 0,50m	SIM- 0,8 NÃO- 1,2 *DND	SIM- 1,0 NÃO- 1,5 *DND	SIM- 0,8 NÃO- 1,2 *DND				
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	508	402	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	40,21	0,20	80	0,8	1,00	1,2	0,15	61,76	ÓTIMO
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	120	124	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	12,42	1,00	25	0,8	1,00	0,80	0,51	63,59	ÓTIMO
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	98	95	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	9,49	0,20	19	0,8	1,00	1,2	0,15	14,58	ÓTIMO
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	109	105	1,00	IA	IA	1,00	1,00	0,80	10,51	0,20	21	0,8	1,00	1,2	0,15	16,15	ÓTIMO
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	223	271	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	27,06	*DND	54	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	262	288	1,00	0,8	0,8	1,00	1,00	0,80	28,80	1,00	58	0,8	1,00	0,80	0,51	147,43	BOM
5	ETA 7	265294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	661	684	1,00	IA	IA	1,00	0,80	1,00	68,40	1,00	137	0,8	1,5	1,2	1,15	787,95	REGULAR
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- Dado não disponibilizado  
 IA- Impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 19- Porcentagem de etas que lançam o lodo em corpos d'água  
 ID 20- Porcentagem das etas que realizam desaguamento do lodo  
 ID 21- Porcentagem de etas que fazem secagem do lodo após desaguamento  
 ID 23- Porcentagem de etas que encaminham o lodo para ete  
 ID 25- porcentagem de etas com mais de 50 anos de implantação  
 ID 26- porcentagem das etas que passaram por alguma reforma no decorrer dos anos de operação  
 ID 27- Porcentagem de etas que possuem espaço disponível para implantação de uma estação de tratamento de lodo (eti)  
 ID 28- Porcentagem das etas que tem previsão de implantação de estação de tratamento de lodo (eti)

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO CENÁRIO	Categoria	Ponderação	
Ótimo <0,4	ÓTIMO	70 < IQA ≤ 100	Ótimo- 0,5 Bom-0,8 Regular - 1,0 Ruim- 1,3 Péssimo- 1,5
Bom 0,4 a 0,8	BOM	51 < IQA ≤ 79	
regular 0,8 a 1,2	REGULAR	36 < IQA ≤ 51	
Ruim 1,2 a 1,8	RUIM	19 < IQA ≤ 36	
Péssimo >1,8	PÉSSIMO	IQA ≤ 19	

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O cenário futuro otimista adotou para o cálculo do volume de resíduos o índice de 1,5% do volume de água tratada, o que gerou uma redução expressiva. Especificamente para o ano de 2024, essa redução foi de 1.321m<sup>3</sup>, e em termos percentuais, aproximadamente 40%. Para o ano de 2035, essa redução foi ainda maior, em termos volumétricos de 1.516 m<sup>3</sup>, e em termos percentuais, aproximadamente 56%. Essas projeções reiteram a importância da prática de análise preditiva e cenários, buscando abordagens inovadoras e eficientes para a gestão de resíduos, garantindo um planejamento mais assertivo e sustentável.

Os critérios estabelecidos para os IDs foram estabelecidos da seguinte forma:

- O ID 06 foi considerado que todos os pontos de captação eram protegidos por vegetação nativa;
- Os valores de IQA foram mantidos, conforme projeção feita anteriormente;
- O ID 19 considerou-se que nenhuma ETA lançaria mais o lodo no corpo d'água;
- O ID 23 permaneceu igual, com somente a ETA 7 enviando lodo para ETE;
- O ID 20 foi considerado que as ETA s que não faziam desaguamento começaram a fazer, com exceção da ETA 7;
- Para o ID 21 foi considerado que as ETA s que no cenário realista faziam desaguamento, passaram a fazer a secagem;
- O ID 25+26 foi considerado que todas as ETAs já teriam recebido alguma benfeitoria;
- O ID 27 foram mantidos os valores;
- O ID 28 foram mantidos os valores.

Essas alterações geraram novos Scores de Análise Preditiva (SAP) bem inferiores se comparados com o cenário atual, provocando mudanças expressivas na estimativa de volume final de resíduos para o ano de 2035, passando de 4.349,98 m<sup>3</sup> no cenário realista para 1.091,45 m<sup>3</sup> no cenário otimista. Em termos percentuais, essa redução é de aproximadamente 75%. Vale salientar que em duas ETAs foi impossível a aplicação de alguns indicadores e valores, devido à indisponibilidade de dados.

Para o ID 20, conforme explicado no cenário realista, o cálculo da redução e volume se deu através da estimativa da massa de lodo para o volume de LETA 2024 universalizado com sólidos totais de 2%. Depois foi estimado o novo volume para uma redução de sólidos totais de 20% (ST). No cenário realista, o volume total era de 330 m<sup>3</sup>, enquanto no otimista passou para 196 m<sup>3</sup>, uma redução de 134 m<sup>3</sup>, em termos percentuais, aproximadamente 40%. Ao avaliar as ETAs separadamente, percebe-se que, em termos percentuais, o volume variou em aproximadamente 50% de um cenário para o outro na maior parte das ETAs.

Comparando os cenários para o ID 21, enquanto no cenário realista cinco ETAs das oito demandavam área inferior a 100 m<sup>2</sup>, no cenário otimista esse número passou a ser de sete. A exceção é a ETA 7, que precisaria de uma área maior. Entretanto, ao avaliar o ID 27, esta ETA não possui disponibilidade de área. Porém, O ID 23 nos mostra que essa estação utiliza uma forma alternativa de descarte de lodo, encaminhando-o para a ETE.

Através da aplicação do Score de Análise Preditiva (SAP) para estimativa do volume final de LETA para o ano de 2035, comparado com o cenário base (realista), percebe-se variações significativas entre as ETAs. Para as ETAs 1,3 e 4: apresentaram redução de volume de aproximadamente 90%. Duas ETAs (2 e 6) tiveram redução de aproximadamente 80%. Já para a ETA 7, essa redução ficou em torno de 60%.

Analisando a evolução das ETAs nos dois cenários baseados na matriz de classificação, percebe-se uma melhora significativa na performance geral. As ETAs 1, 3 e 4 ascenderam de um cenário regular para ótimo, enquanto a ETA 2 apresentou um salto ainda mais expressivo, saindo de um cenário ruim para ótimo. A ETA 6 melhorou de ruim para bom, enquanto a ETA 7 permaneceu com um cenário regular.

Ao analisar as mudanças ocorridas de um cenário para outro, percebe-se o grau de relevância da análise preditiva e cenários futuros, como ferramenta para otimização no desempenho e aprimoramento dessas unidades. Aprimoramento este, que vai muito além da gestão de resíduos, mas que pode ser empregado nas mais diversas demandas de uma estação de tratamento de água.

#### **4.5.3. Cenário pessimista para o LETA**

O cenário pessimista, construído sobre as premissas do realista, adota o índice máximo da literatura (5%) para a estimativa de lodo para os anos de 2024 e 2035, o dobro do valor realista. Com isso, comparando os cenários realista e pessimista, prevê-se um aumento de 3.302 m<sup>3</sup> em 2024 e de 3.485 m<sup>3</sup> em 2035 de LETA, resultando em um aumento de 50% do volume de um cenário para o outro. No entanto, é relevante notar que a variação de volume no cenário pessimista entre os anos de 2024 e 2035 é de apenas 183 m<sup>3</sup>, o que, em uma década, evidencia uma relativa estabilidade na geração desse resíduo. A Tabela 13 apresenta o cenário pessimista para a estimativa do lodo de ETA.

Tabela 3260 - Cenário pessimista para estimativa do volume de LETA

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																								
Identificação				Análise preditiva multicritério para LETA																				
				Geração de lodo					Manancial				Tratamento lodo - gestão				Infraestrutura		Planejamento		Score de análise preditiva (SAP)	Vol. final LETA universalizado (2035)	Análise do cenário	
Munic.	ETAs	Crescimento populacional		Volume de água tratada	Universalização - ID 01			Vol. de resíduos		Proteção manancial			Lang. Em corpo d'água	Enc. lodo para ETE	Desaguamento		Secagem		ETAs antigas que foram reformadas	Área disponível				Previsão ETL/ projeto
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. Água trat. Atend. pop.. (100%) 2024	Vol. Água trat. Atend. pop. (100%) 2035	LETA adot. 5% (2024)	LETA adot. 5% (2035)	ID 06	IQA (2024)	IQA (2035)	ID 19	ID 23	ID 20	Vol. LETA desaguado (m³) (2035)	ID 21 (2024)	Estimativa área para secagem leta (m²) (2035)	ID 25+ID 26	ID 27				ID 28
				FORMULÁRIO (m³/dia)	SNIS	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	SIM-1,0 NÃO-1,5 *DND	ÓTIMO-0,5 BOM-0,8 REGULAR-1,0 RUIM-1,3 PÉSSIMO-1,5	SIM-1,5 NÃO-1,0 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,0 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,0 *DND	ST-20%	SIM-0,2 NÃO-1,0 *DND	HL=0,50m	SIM-0,8 NÃO-1,2 *DND	SIM-1,0 NÃO-1,5 *DND	SIM-0,8 NÃO-1,2 *DND	(m³)	Baseado na matriz de classificação de cenário.		
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,38%	33.854	34.961	1693	1748	1,5	IA	IA	1,00	1,00	0,80	174,81	1,00	350	0,80	1,00	1,20	1,15	2013,77	REGULAR
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	401	414	1,5	IA	IA	1,50	1,00	1,00	41,40	1,00	83	1,20	1,00	0,80	2,16	894,27	PÉSSIMO
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	327	316	1,5	IA	IA	1,00	1,00	0,80	31,63	1,00	63	1,20	1,00	1,20	1,73	546,62	RUIM
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	362	350	1,5	IA	IA	1,00	1,00	0,80	35,04	1,00	70	1,20	1,00	1,20	1,73	605,48	RUIM
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,30%	14.961	18.038	743	902	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	90,19	*DND	190	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	875	960	1,5	0,8	0,8	1,50	1,00	1,00	95,99	1,00	192	0,80	1,00	0,80	1,44	1382,19	RUIM
5	ETA 7	285294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	2.203	2.280	1,50	IA	IA	1,00	0,80	1,00	227,99	1,00	456	0,80	1,50	1,20	1,73	3939,74	RUIM
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- Dado não disponibilizado  
 IA- Impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 19- Porcentagem de etas que lançam o lodo em corpos d'água  
 ID 20- Porcentagem das etas que realizam desaguamento do lodo  
 ID 21- Porcentagem de etas que fazem secagem do lodo após desaguamento  
 ID 23- Porcentagem de etas que encaminham o lodo para ete  
 ID 25- porcentagem de etas com mais de 50 anos de implantação  
 ID 26- porcentagem das etas que passaram por alguma reforma no decorrer dos anos de operação  
 ID 27- Porcentagem de etas que possuem espaço disponível para implantação de uma estação de tratamento de lodo (etl)  
 ID 28- Porcentagem das etas que tem previsão de implantação de estação de tratamento de lodo (etl)

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO CENÁRIO	
Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA < 100
BOM	51 < IQA < 79
REGULAR	36 < IQA < 51
RUIM	19 < IQA < 36
PÉSSIMA	IQA < 19

Ótimo- 0,5  
 Bom-0,8  
 Regular - 1,0  
 Ruim- 1,3  
 Péssimo- 1,5

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

No cenário pessimista, a principal distinção nos critérios estabelecidos para os IDs reside no ID 06, que passou a considerar todos os pontos de captação desprotegidos. Os demais IDs, por sua vez, foram mantidos seguindo as definições do cenário de base.

Conforme já comentado anteriormente, considerando uma redução de 20% em sólidos totais, foi calculado o volume do lodo desaguado para o ID 20 para os três cenários, resultando em: 330m<sup>3</sup> no realista, 196,88m<sup>3</sup> no otimista e 697,05m<sup>3</sup> no pessimista. Diante disso, esses dados demonstram que:

- O cenário otimista apresentou uma redução de cerca de 40% em relação ao realista, indicando uma otimização considerável, apontando para a viabilidade de alcançar maior sustentabilidade e eficiência operacional;
- Por outro lado, a transição do cenário otimista para o pessimista implica um aumento significativo de 71% no volume, criando um alerta para o emprego de medidas emergenciais;
- Em uma comparação direta entre o cenário realista e o pessimista, a variação é de aproximadamente 52%, o que ainda ressalta o impacto do cenário mais desfavorável.

Foi estimado para o ID 21 uma área de secagem para cada ETA. Apesar do ID 21 não ter sofrido alterações, a demanda por área aumentou significativamente devido apenas ao aumento do volume de resíduo. Enquanto no cenário realista 5 (cinco) ETAs das 8 (oito) demandavam área inferior a 100 m<sup>2</sup>, no cenário pessimista esse número diminuiu para três. As outras quatro estações demandam áreas variando entre 100 e 400 m<sup>2</sup>. A exceção é a ETA 7, que precisaria de uma área maior. Entretanto, conforme dito anteriormente, esta estação não possui disponibilidade de área, e por isso encaminha seu lodo para a ETE.

A comparação da estimativa de volume final de lodo das ETAs para o ano de 2035 utilizando o Score de Análise Preditiva (SAP), em relação ao cenário base (realista), revela um aumento substancial no volume de lodo gerado para o cenário pessimista. Especificamente, as ETAs 1 e 6 apresentaram um aumento de 100% do volume. Por outro lado, as ETAs 2, 3, 4 e 7 apresentam um aumento ainda mais expressivo da ordem de 200%. Esse dado destaca a necessidade de

adoção de medidas que venham a mitigar os possíveis impactos que podem ser gerados por este aumento, especialmente nas estações que obtiveram maiores percentuais.

Comparando o cenário das Estações de Tratamento de Água (ETAs) pela matriz de classificação, percebe-se que, apesar de ser um cenário desfavorável, a performance das estações se configurou da seguinte forma:

- A ETA 1 manteve sua classificação como regular, mesmo diante das condições adversas do cenário;
- A ETA 2 teve uma piora, passando de ruim para péssimo;
- As ETAs 3 e 4 também regrediram um nível, passando de regular para ruim;
- As ETAs 6 e 7 permaneceram classificadas como ruim, sem alteração em sua condição, apesar das condições propostas pelo cenário.

Ao analisar este cenário futuro pessimista e mais desfavorável, baseado na matriz de classificação, observa-se que a maioria das ETAs foi impactada negativamente. Embora a ETA 1 tenha apresentado resiliência e mantido sua classificação regular, a queda de desempenho da ETA 2 (ruim para péssimo) e das ETAs 3 e 4 (de regular para ruim), somado à permanência do status das ETAs 6 e 7, demonstra a vulnerabilidade do sistema. Apontando para a necessidade imediata de intervenções que minimizem os riscos de degradação de performance das ETAs em cenários futuros desafiadores.

#### 4.6. ELABORAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS PARA A ALAF

Conforme feito anteriormente para o lodo, foram elaborados três cenários futuros para a água de lavagem dos filtros (ALAF). Foi elaborado um cenário realista que serviu como base para os outros dois otimista e pessimista.

##### 4.6.1. Cenário realista para a ALAF

Para a elaboração dos cenários para a água de lavagem dos filtros, aplicou-se a metodologia de análise multicritério que possibilitou a escolha dos indicadores, e em seguida a atribuição de valores para estes baseados em

critérios pré-estabelecidos. O Quadro 13 apresenta a lista de indicadores selecionados para ALAF com seus critérios e valores atribuídos.

Quadro 2083 - Critérios estabelecidos para os indicadores selecionados na análise multicritério

Critérios estabelecidos para os indicadores baseados na análise multicritério - ALAF			
Indicador	Cód. Ind.	Val. Adot.	Justificativa
Pontos de captação protegidos por vegetação nativa	ID 06	SIM- 1,00 NÃO- 1,50	não altera a qualidade da água.
Índice de qualidade da água	IQA	ÓTIMO- 0,50 BOM - 0,80 REGULAR- 1,00 RUIM - 1,30 PÉSSIMO - 1,50	Utilizou a classificação da CETESB como base
Etas que reusam / reciclam a alaf	ID 16	recirculação-0,80 reúso/ recicla -0,40 NFN - 1,20	1- Se tem sistema de recirculação; 2- Implementação de prática de reúso ou reciclagem; 3- Não faz nada (NFN)
Forma de lavagem dos filtros	ID 22	ÁGUA-1,00 ÁGUA+AR -0,50	1,0 - Contribui para o aumento do volume de resíduo; 0,5- Diminuição do volume de resíduo.
Etas que lançam a alaf em corpos d'água	ID 24	SIM- 1,50 NÃO-1,00	Impactos ambientais e ausência de gestão de resíduos.
Etas antigas que já passaram por reforma	ID 25+26	SIM- 1,50 NÃO-1,00	Prolongamento da vida útil, eficiência, conformidade, segurança, práticas de gestão

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Foi elaborado um cenário para estimativa da água de lavagem dos filtros para cada uma das ETAs em estudo. Para estimar o volume deste resíduo, utilizaram-se indicadores presentes na literatura, O ID 01 (porcentagem da população atendida com água tratada - universalização) e o volume de água tratada da ETA, obtido através da aplicação do formulário nas visitas. O primeiro cenário elaborado, também chamado de realista, baseou-se em dados obtidos na fase de diagnóstico. A Tabela 14 apresenta o cenário realista para a estimativa da ALAF.

Tabela 3916 - Cenário realista para estimativa do volume de ALAF

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																			
Identificação				Análise preditiva multicritério para ALAF															
				Geração de resíduo						Manancial				Gestão	Infraestrutura	Score de análise preditiva (SAP)	Vol. final ALAF universalizado (2035)	Análise do cenário	
Munic.	ETAs	Crescimento populacional		Vol. De água tratada	Universalização - ID 01		Volume de resíduo		Proteção manancial			Laç. Em corpos d'água	Destinação/ forma de lavagem dos filtros	Reúso/ reciclagem/ recirculação	ETAs antigas que foram reformadas				
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. água trat. Atend.pop. (100%) 2024	Vol. água trat. Atend.pop. (100%) 2035	ALAF adot. 5% (2024)	ALAF adot. 5% (2035)	ID 06	IQA (2024)	IQA (2035)	ID24	ID22	ID 16				ID 25+ID 26
				FORM	SNIS	(M³)	(M³)	(M³)	(M³)	SIM- 1,0 NÃO- 1,5 *DND	ÓTIMO- 0,5 BOM - 0,8 REGULAR- 1,0 RUIM - 1,3 PÉSSIMO - 1,5	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	ÁGUA-1,0 ÁGUA+AR - 0,5 *DND	recirculação- 0,8 reúso/ recicla -0,4 NFN - 1,2	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	(m³)			
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	1.693	1748	1,5	IA	IA	1,00	0,50	0,8	1,5	0,90	1.573,26	REGULAR
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	401	414	1,0	IA	IA	1,5	0,50	1,2	1,00	0,90	372,61	REGULAR
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	327	316	1,0	IA	IA	1,00	1	1,2	1,00	1,20	379,60	REGULAR
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	362	350	1,0	IA	IA	1,00	1	1,2	1,00	1,20	420,47	REGULAR
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	743	902	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	875	960	1,5	0,8	0,8	1,5	0,50	1,2	1,5	2,03	1.943,71	PÉSSIMO
5	ETA 7	265294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	2.203	2280	1,00	IA	IA	1,00	1	*DND	1,5	1,50	3.419,92	PÉSSIMO
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- dado não disponibilizado  
 IA- Impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 01- população atendida no município com água tratada  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 16- Porcentagem das etas que reusam / reciclam a alaf  
 ID 22- Forma de lavagem dos filtros  
 ID 24- porcentagem das etas que lançam a alaf em corpos d'água  
 ID 25 e ID 26- Etas antigas que já passaram por reforma  
 ID 27- porcentagem de etas que possuem espaço disponível

Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA ≤ 100
BOM	51 < IQA ≤ 79
REGULAR	36 < IQA ≤ 51
RUIM	19 < IQA ≤ 36
PÉSSIMA	IQA ≤ 19

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para estimar o volume de água de lavagem dos filtros (ALAF) no cenário realista, foi adotado o índice de 5% do volume de água tratada. Esse percentual foi escolhido com base na literatura, indica que o volume de ALAF pode chegar a até 10% do volume de água tratada (Ismail *et al.*, 2020).

Ao partir dessa premissa, o volume diário de água de lavagem para todas as estações de tratamento de água é de 6.604 m<sup>3</sup>/dia para 2024 e de 6.970 m<sup>3</sup>/dia para 2035. Avaliando a diferença no volume de ALAF entre esses anos, é de apenas 366m<sup>3</sup>/dia, o que pode ser considerado uma diferença relativamente pequena se levarmos em conta o intervalo de quase uma década e a universalização já considerada em ambos os casos.

Os volumes diários de água de lavagem para cada ETA apresentam uma variação considerável, abrangendo um intervalo que vai desde 300 m<sup>3</sup>/dia a pouco mais de 2000 m<sup>3</sup>/dia. Essa amplitude de valores evidencia diretamente a capacidade operacional e as dimensões de cada estação.

Os dados foram divididos em subcategorias na tabela, a fim de facilitar a compreensão dos dados constantes no Quadro 13, que são: manancial, gestão e infraestrutura. Para cada uma destas categorias foram selecionados IDs para avaliação.

Na categoria de análise do manancial, os critérios adotados foram: o ID 06, que aborda a proteção dos pontos de captação por vegetação nativa, o índice de qualidade da água (IQA), o ID 22 formas de lavagem dos filtros e o ID 24 ETAs que lançam a ALAF em corpos d'água. Os critérios utilizados para determinação dos valores atribuídos a cada ID constam no Quadro 13.

Ao analisar o ID 06, percebe-se que 50% dos pontos de captação encontram-se protegidos por vegetação nativa, enquanto os outros 50% estão desprotegidos, conforme já observado na análise do lodo. Vale salientar que a proteção do ponto de captação por vegetação nativa apenas mantém a qualidade da água do manancial.

Conforme já citado anteriormente na análise do lodo, somente um ponto do IQA está ligado a uma das ETAs analisadas (ETA 6). Vale salientar que somente nesse ponto há o monitoramento da qualidade da água para abastecimento público.

Ao analisar o ID 24, que se refere às estações de tratamento de água que ainda descartam a ALAF nos corpos d'água, observa-se que duas estações, ou seja, 25% do total, ainda mantêm essa prática. Em contraste, 50% das ETAs já não o fazem.

Para o ID 22, que trata da forma de lavagem dos filtros, observa-se uma equivalência entre as estações de tratamento de água. Das oito ETAs analisadas, três realizam a lavagem utilizando o método de ar + água, enquanto outras três empregam exclusivamente água para lavagem.

Ao analisar o ID 16, que se refere às ETAs que fazem recirculação de água ou reuso e reciclagem, constatou-se que apenas uma das estações de tratamento de água faz exclusivamente a recirculação, enquanto as demais não implementam nenhuma dessas práticas. Este dado evidencia uma oportunidade significativa de implementação para melhorias e otimização no uso da água. literatura recomenda que a recirculação da ALAF deve ser avaliada para cada caso Cornwell e Lee (1993), Kawamura (1991) citados por Campos (2014).

Ao analisar os resultados obtidos com a aplicação do score de análise preditiva (SAP) para estimativa do volume final de água de lavagem dos filtros para o ano de 2035, pode-se observar variações significativas entre as ETAs, conforme exposto abaixo:

ETAs 1 e 2 apresentaram uma diminuição do volume de aproximadamente 175 m<sup>3</sup>/dia, em termos percentuais, uma redução de 10%, em relação ao volume estimado.

As demais ETAs tiveram um aumento no volume, que variou em um intervalo de 20% a 100%.

Da mesma forma que foi aplicado para o lodo, foi utilizada a matriz de estratificação por intervalos constante no rodapé da Tabela 14, que utiliza os valores do Score de Análise Preditiva (SAP), fornecendo uma classificação clara do desempenho das ETAs. Essa metodologia categoriza a situação de cada ETA com base no seu "grau de impacto" qualitativo, conforme o SAP. Os resultados obtidos são os seguintes:

- Nenhuma ETA obteve score suficiente para se enquadrar nos cenários Ótimo ou Bom, evidenciando que as estações precisam aderir práticas de gestão de resíduos com o objetivo de minimizar os impactos ambientais;

- As ETAs 1, 2, 3 e 4 foram classificadas no cenário Regular, o que, embora não seja o pior, ainda está longe do ideal em termos de práticas sustentáveis de gestão de resíduos;

- Preocupantemente, as ETAs 6 e 7 foram classificadas em um cenário Péssimo, acendendo um sinal de alerta para a implementação emergencial de medidas e práticas de gestão de resíduos nessas unidades.

Em síntese, a análise preditiva aponta que há um déficit generalizado nas práticas de gestão de resíduos em todas as ETAs avaliadas. Sinalizando que sejam desenvolvidos e implementados planos de ação robustos, priorizando as ETAs em situação mais crítica, a fim de mitigar os impactos ambientais e promover uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável.

#### **4.6.2. Cenário futuro otimista para a ALAF**

O cenário futuro otimista foi baseado nas premissas do cenário realista. No cenário realista, foi adotado o índice de 2,5% para estimar o volume de água de lavagem (ALAF) em relação ao volume de água tratada. As premissas estabelecidas para os indicadores foram as seguintes:

- ID 06 (pontos de captação) - considerou-se que todos os pontos estariam protegidos;

- ID 24 (Descarte de ALAF) – ficou estabelecido que nenhuma ETA descartaria a ALAF em corpos d'água, indicando um tratamento ou destinação alternativa;

- ID 22 (forma de lavagem dos filtros) – determinou-se que todas as ETAs realizariam a lavagem dos filtros empregando ar e água;

- ID 16 (Recirculação/ Reuso/ Reciclagem) - estabeleceu-se que as ETAs que já praticavam recirculação passariam a realizar reuso, e aquelas que não faziam nada, passariam a implementar a recirculação;

- ID 25+26 (ETAs antigas que foram reformadas) - permaneceu conforme o cenário de base.

Os volumes diários de água de lavagem de filtros (ALAF) foram reduzidos pela metade, devido à adoção do índice de 2,5%, se comparado com o cenário

realista. O valor do IQA também permaneceu o mesmo, conforme apresentado na Tabela 15, para o cenário futuro otimista.

Tabela 4412 - Cenário otimista para estimativa do volume de ALAF

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																			
Identificação				Análise preditiva multicritério para ALAF															
				Geração de resíduo				Manancial				Tratamento/ Gestão		Infraestrutura		Score de análise preditiva (SAP)	Vol.final ALAF universalizado (2035)	Análise do cenário	
Munic.	ETAs	Crescimento populacional		Vol. De água tratada	Universalização - ID 01		Volume de resíduo		Proteção manancial			Lang. Em corpos d'água	Destinação/ forma de lavagem dos filtros	Reúso/ reciclagem/ recirculação	ETAS antigas que foram reformadas				
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. água trat. Atend. pop. (100%) 2024	Vol. água trat. Atend. pop. (100%) 2035	ALAF adot. 2,5% (2024)	ALAF adot. 2,5% (2035)	ID 06	IQA (2024)	IQA (2035)	ID24	ID22	ID 16	ID 25-ID 26			
				FORM	SNIS	(M*)	(M*)	(M*)	(M*)	SIM- 1,0 NÃO- 1,5 *DND	ÓTIMO- 0,5 BOM - 0,8 REGULAR- 1,0 RUIM - 1,3 PÉSSIMO - 1,5	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	ÁGUA-1,0 ÁGUA-AR -0,5 *DND	recirculação- 0,8 reúso/ recicla -0,4 NFN - 1,2	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND		(m³)		Baseado na matriz de classificação de cenário.
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	846	874	1,0	IA	IA	1,00	0,50	0,4	1,5	0,30	262,21	ÓTIMO
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	200	207	1,0	IA	IA	1,00	0,50	0,8	1,00	0,40	82,80	BOM
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	164	158	1,0	IA	IA	1,00	0,50	0,8	1,00	0,40	63,27	BOM
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	181	175	1,0	IA	IA	1,00	0,50	0,8	1,00	0,40	70,08	BOM
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	372	451	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	437	480	1,0	0,8	0,8	1,00	0,50	0,8	1,5	0,60	287,96	BOM
5	ETA 7	285294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.539	1.102	1140	1,00	IA	IA	1,00	0,50	*DND	1,5	0,75	854,98	REGULAR
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	*DND	IA	IA	*DND	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- dado não disponibilizado  
 IA- impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 01- população atendida no município com água tratada  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 16- Porcentagem das etas que reusam / reciclam a alaf  
 ID 22- Forma de lavagem dos filtros  
 ID 24- porcentagem das etas que lançam a alaf em corpos d'água  
 ID 25 e ID 26- Etas antigas que já passaram por reforma  
 ID 27- porcentagem de etas que possuem asnacn disponível

Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA ≤ 100
BOA	51 < IQA ≤ 79
REGULAR	36 < IQA ≤ 51
RUIM	19 < IQA ≤ 36
PÉSSIMA	IQA ≤ 19

Fonte: Elaborado pela autora, 2025

Considerando o cenário futuro otimista apresentado na Tabela 15, ao analisar o ID 16, observa-se que apenas uma das oito ETAs passou a fazer o reuso/reciclagem da ALAF, enquanto as demais adotaram a recirculação como prática mitigadora de impacto. Embora a recirculação seja uma forma alternativa para redução do volume de resíduo, a literatura recomenda que o emprego desta prática seja estudado de forma individualizada para cada estação. A baixa adesão ao reuso/reciclagem, presente apenas em uma ETA, indica que há um potencial significativo a ser explorado na gestão de resíduos oriundos do tratamento de água.

Apesar da recirculação não ser a melhor alternativa para destinação da ALAF, a transição proposta da recirculação para o reuso/reciclagem representa um pequeno passo em direção à melhoria ambiental

Na aplicação da matriz de estratificação por intervalos, os resultados obtidos foram os seguintes, para o cenário futuro otimista:

- Todas as estações de tratamento de água alteraram a sua classificação comparado ao cenário realista;
- A ETA 1, que havia sido classificada como regular passou para ótimo; pressupõe que essa mudança de classe esteja relacionada com a mudança da prática de recirculação para reuso;
- As ETAs 2, 3 e 4 saíram de um cenário regular para bom, essa mudança pode estar associada a atribuição da prática de recirculação da ALAF para essas ETAs;
- As ETAs 6 e 7 saíram de uma classificação péssima para bom e regular respectivamente, essa alteração também está associada ao ID 16.

Diante do exposto, como todas as estações de tratamento de água mudaram de classificação, se comparado ao cenário realista e como houve mudanças expressivas nos valores dos scores, conclui-se que os critérios adotados para os IDs influenciaram para a ocorrência dessas alterações.

#### **4.6.3. Cenário futuro pessimista para a ALAF**

Para o cenário pessimista, foi atribuído o índice de 10% para cálculo do volume da água de lavagem dos filtros (ALAF). Comparando os volumes de ALAF com o cenário realista, seria o dobro do volume do cenário base, o que

varia na ordem de 13.208 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2024 e na ordem de 13.941 m<sup>3</sup>/dia para 2035. O único indicador que teve alteração neste cenário em relação ao cenário base foi o ID 06 (pontos de captação), considerando todos os pontos desprotegidos. A Tabela 16 apresenta o cenário pessimista de estimativa da ALAF.

Tabela 4668 - Cenário pessimista para estimativa do volume de ALAF

Análise dos Resíduos Gerados do Tratamento de Água																			
Identificação				Análise preditiva multicritério para ALAF															
				Geração de resíduo					Manancial				Gestão	Infraestrutura	Score de análise preditiva (SAP)	Vol.final ALAF universalizado (2035)	Análise do cenário		
Munic.	ETAs	Crescimento populacional		Vol. De água tratada	Universalização - ID 01		Volume de resíduo		Proteção manancial			Lanç. Em corpos d'água	Destinação/ forma de lavagem dos filtros	Reúso/ reciclagem/ recirculação				ETAS antigas que foram reformadas	
		2024 (IBGE)	2035 (IBGE)	2024	ID 01 (%)	Vol. Água trat. Atend. pop. (100%) 2024	Vol. Água trat. Atend. pop. (100%) 2035	ALAF adot. 10% (2024)	ALAF adot. 10% (2035)	ID 06	IQA (2024)	IQA (2035)	ID24	ID22	ID 16	ID 25+ID 26			
				Formulário	SNIS	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	(m³/dia)	SIM- 1,0 NÃO- 1,5 *DND	ÓTIMO- 0,5 BOM - 0,8 REGULAR- 1,0 RUIM - 1,3 PÉSSIMO - 1,5	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	ÁGUA-1,0 ÁGUA+AR -0,5 *DND- 0	recirculação-0,8 reúso/recicla -0,4 NFN - 1,2	SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	(m³)	Baseado na matriz de classificação de cenário.		
1	ETA 1	252318	260574	32.832	96,98%	33.854	34.961	3.385	3496	1,50	IA	IA	1,00	0,50	0,80	1,50	0,90	3.146,51	REGULAR
	ETA 2			7.776		8.018	8.280	802	828	1,50	IA	IA	1,50	0,50	1,20	1,00	1,35	1.117,84	RUIM
2	ETA 3 e 4 - semana	24423	23624	6.500	99,38%	6.541	6.327	654	633	1,50	IA	IA	1,00	1	1,20	1,00	1,80	1.138,79	RUIM
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana			7.200		7.245	7.008	724	701	1,50	IA	IA	1,00	1	1,20	1,00	1,80	1.261,42	RUIM
3	ETA 5	137323	166680	14.400	96,90%	14.861	18.038	1.486	1804	0	IA	IA	0	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA
4	ETA 6	68395	75056	17.280	98,78%	17.493	19.197	1.749	1920	1,50	0,8	0,8	1,50	0,50	1,20	1,50	2,03	3.887,41	PÉSSIMO
5	ETA 7	265294	274535	44.064	100,00%	44.064	45.599	4.406	4560	1,50	IA	IA	1,00	1	*DND	1,50	2,25	10.259,75	PÉSSIMO
6	ETA 8	9484	9848	*DND	83,27%	IA	IA	IA	IA	0	IA	IA	0	*DND	*DND	*DND	IA	IA	IA

\* DND- dado não disponibilizado  
 IA- Impossibilidade de aplicação  
 IQA- Índice de qualidade da água  
 ID 01- população atendida no município com água tratada  
 ID 06- Ponto de captação protegido  
 ID 16- Porcentagem das etas que reusam / reciclam a alaf  
 ID 22- Forma de lavagem dos filtros  
 ID 24- porcentagem das etas que lançam a alaf em corpos d'água  
 ID 25 e ID 26- Etas antigas que já passaram por reforma  
 ID 27- porcentagem de etas que possuem espaço disponível

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO CENÁRIO	
Ótimo	<0,4
Bom	0,4 a 0,8
regular	0,8 a 1,2
Ruim	1,2 a 1,8
Péssimo	>1,8

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	75 < IQA ≤ 100
BOM	51 < IQA ≤ 75
REGULAR	36 < IQA ≤ 51
RUIM	19 < IQA ≤ 36
PÉSSIMA	IQA ≤ 19

Ao analisar o volume final estimado de ALAF para o ano de 2035 com a aplicação do Score de Análise Preditiva, a ETA 1 apresentou uma redução de aproximadamente 350 m<sup>3</sup>/dia em relação ao valor estimado pelo índice da literatura. Essa diminuição representa em termos percentuais aproximadamente 10%. Essa diferença pode ser atribuída ao índice adotado (10%), indicando que não haveria mudança na geração de volume de resíduo. É importante notar que não houve alteração no Score de Análise Preditiva da ETA, o que reforça sua classificação como regular. Por outro lado, as demais estações apresentaram aumento no volume final estimado de ALAF para o ano de 2035 com a aplicação do Score de análise Preditiva, em termos percentuais o aumento destes volumes variou entre 35% e mais de 100%.

A ETA 2 apresentou um aumento de volume de aproximadamente 35% e uma alteração no valor do score, o que implica em uma piora da classificação desta estação de tratamento de água, saindo de regular para ruim. A mesma situação se repete nas ETAs 3 e 4, porém com um aumento de volume muito mais expressivo, em torno de 80%. Esse dado reflete alteração no valor do score calculado, saindo de 1,2 para 1,8. O que conseqüentemente provocou a mudança de classificação destas estações de tratamento de água da categoria regular para ruim.

As estações de tratamento de água (ETAs 6 e 7) duplicaram a geração de volume de ALAF, o que implica em termos percentuais maiores que 100%. Porém, esse aumento de volume decorre não da mudança do valor do score, mas do volume estimado baseado no índice da literatura (10%), o dobro do valor adotado no cenário realista (5%). Como não houve mudanças relevantes no valor do score, a classificação destas ETAs permaneceu igual ao cenário realista (péssima).

Portanto, percebe-se que as alterações observadas para este cenário futuro pessimista, quanto ao volume final de resíduos gerados nos filtros (ALAF) e na mudança de faixa de classificação das ETAs, estavam mais relacionadas com o índice da literatura adotado para estimativa do volume de resíduo, do que com os critérios estabelecidos para os indicadores.

#### 4.7. COMPARATIVO DO VOLUME DE RESÍDUOS GERADOS (LETA E ALAF) NOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Para comparar o volume de resíduos gerados (LETA e ALAF) em todos os cenários e avaliar o aumento e diminuição desses volumes, foi montado uma tabela com esses dados que se encontra apresentada na Tabela 17.

Tabela 4732 - Comparativo do volume de resíduos gerados nos cenários propostos

Comparativo do volume de resíduos gerados nos cenários propostos (2035)																			
Identificação		Análise crítica dos cenários de geração de leta (2035)									Análise crítica dos cenários de geração de alaf (2035)								
		Cenário realista (A)	Cenário otimista (B)	Cenário pessimista (C)	comparação do volume de leta entre cenários						Cenário realista (A)	Cenário otimista (B)	Cenário pessimista (C)	comparação do volume de alaf entre cenários					
(A-B) - melhora/ diminuição do volume					(A-C) - piora/ aumento do volume		(C-B) melhora/ diminuição do volume		(A-B) melhora/ diminuição do volume					(A-C) - piora/ aumento do volume		(C-B) melhora/ diminuição do volume			
Munic.	ETAs				(m³)	%	(m³)	%	(m³)	%				(m³)	%	(m³)	%	(m³)	%
1	ETA 1	1006,88	80,55	2.013,77	-926,33	-92	1.006,88	100	-1.933,22	-96	1.573,26	262,21	3.146,51	-1.311,05	-83,33	1.573,26	100,00	-2.884,30	-91,7
	ETA 2	298,09	63,59	894,27	-234,50	-79	596,18	67	-830,68	-93	372,61	82,80	1.117,84	-289,81	-77,78	745,23	200,00	-1.035,04	-92,6
2	ETA 3 e 4 - semana	182,21	14,58	546,62	-167,63	-92	364,41	67	-532,04	-97	379,60	63,27	1.138,79	-316,33	-83,33	759,19	200,00	-1.075,52	-94,4
	ETA 3 e 4 - feriado e fim de semana	201,83	16,15	605,48	-185,68	-92	403,66	67	-589,34	-97	420,47	70,08	1.261,42	-350,40	-83,33	840,95	200,00	-1.191,34	-94,4
3	ETA 5	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA
4	ETA 6	691,10	147,43	1.382,19	-543,66	-79	691,10	50	-1.234,76	-89	1.943,71	287,96	3.887,41	-1.655,75	-85,19	1.943,71	100,00	-3.599,46	-92,6
5	ETA 7	1969,87	787,95	3.939,74	-1.181,92	-60	1.969,87	50	-3.151,79	-80	3.419,92	854,98	10.259,75	-2.564,94	-75,00	6.839,83	200,00	-9.404,77	-91,7
6	ETA 8	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para comparar o volume de resíduos entre os cenários elaborados, utilizou-se a fórmula ilustrada pela Figura 26, que estima a diferença de volume de resíduos gerados em termos percentuais de um cenário para outro.

Figura 133606 - Equação para cálculo da diferença de volume de resíduos gerados em termos percentuais de um cenário para o outro

$$\text{Cálculo da diferença (\%)} = ((\text{Valor final} - \text{Valor inicial}) / \text{Valor inicial}) \times 100$$

Fonte: Iezzi, Gelson *et al.* 2011.

Realizou-se a comparação tanto para o LETA como para ALAF, entre os seguintes cenários: primeiramente entre o cenário realista e otimista, onde se tem uma melhora no cenário e uma redução do volume de resíduo produzido. A segunda comparação foi entre o cenário pessimista e realista, no qual se espera uma piora e aumento na geração de volume.

Ao avaliar o cenário para o LETA, observamos as seguintes variações de volume entre as simulações:

- ETA 1 - A variação de volume entre as três simulações foi de aproximadamente 4%, seja para os cenários de melhora e diminuição de volume ou de piora e aumento de volume, tem-se um equilíbrio;
- ETA 2 - Para as simulações que preveem uma melhora de cenário e diminuição de volume, a diferença da variação foi de 14%. Já a diferença entre os cenários (realista x pessimista) e (pessimista x otimista) alcançou 26%;
- ETA 3 e 4 - Comparando os cenários de melhora e diminuição de volume, a redução de volume de resíduos fica acima dos 90%, podendo chegar até 97% na terceira simulação. Avaliando a coluna de piora e aumento de volume (realista pessimista), verifica-se um aumento de volume de 67%;
- ETA 6 - Ao analisar as condições que estimam simulam melhora e diminuição de volume, em termos percentuais a diferença é muito pequena, apenas de 10%. Olhando para a situação em que se tem um cenário pior devido ao aumento de volume, esse aumento é de 50%.
- ETA 7- Comparando as colunas (A-B) e (C-B), percebe-se que a diminuição do volume de LETA de uma situação para outra é de 20%, um valor considerado bem representativo. Quanto a coluna que prevê o aumento de

volume, esse aumento é da ordem de 50% em relação ao volume atual estimado;

Ao avaliar o cenário para a ALAF, observamos as seguintes variações de volume entre as simulações:

- ETA 1 - Nas situações que estabelecem melhora e diminuição de volume, a variação entre elas é muito pequena, de apenas 8%. Para a situação (A-C) o aumento de volume é da ordem de 100% comparado ao volume estimado realista;
- ETA 2 - A situação (A-C), mostra um aumento de volume de 200%, ou seja, o volume é triplicado em relação ao volume do cenário realista, um dado preocupante. Já nas situações de diminuição de volume, esses percentuais ficam em torno de 77% (A-B) e 92% (C-B), uma diferença de 15% entre elas;
- ETA 3 e 4 - A situação (A-C) se repete para estas ETAs, mostrando um aumento de volume de 200%, ou seja, o volume é triplicado em relação ao volume do cenário realista, um dado preocupante. Já nas situações de diminuição de volume, esses percentuais ficam em torno de 83% (A-B) e 94% (C-B), uma diferença de 11% entre elas;
- ETA 6 - A situação (A-C) mostra um aumento de volume de 100%, ou seja, o volume é duplicado em relação ao volume do cenário realista, o que cria um sinal de alerta. Já nas situações de diminuição de volume, esses percentuais ficam em torno de 85% (A-B) e 92% (C-B), uma diferença de 7% entre elas;
- ETA 7 - A situação (A-C) mostra um aumento de volume de 200%, ou seja, o volume é triplicado em relação ao volume do cenário realista, um dado bem preocupante. Já nas situações de diminuição de volume, esses percentuais ficam em torno de 75% (A-B) e 91% (C-B), uma diferença considerável de 16% entre elas.

Através dos cenários futuros propostos nesta pesquisa, é possível avaliar, baseado em dados, as melhores ações para cada ETA, adotar práticas de gestão de resíduos, aplicação dos recursos, fomentar práticas de sustentabilidade e definir um planejamento estratégico mais adequado e eficaz. Além de possibilitar

uma análise preditiva quanto a resiliência dessas estações de tratamento de água frente aos diferentes cenários futuros (realista, otimista e pessimista).

#### 4.8. PROPOSTA DE INDICADORES ESTRATÉGICOS (IEs)

A partir dos cenários elaborados para o lodo e a água de lavagem dos filtros e fundamentado no estudo de Galdophi (2023) sobre o uso de indicadores na gestão de lodo de ETE, propuseram-se 06 indicadores estratégicos (IEs) para cada um dos resíduos, cuja seleção obedeceu ao critério de incluir no mínimo um e no máximo dois indicadores por categoria.

A proposição dos indicadores estratégicos foi um refinamento daqueles já utilizados na proposta dos cenários, avaliando os que mais impactaram no cálculo do Score de Análise Preditiva (SAP) por categoria.

Alguns indicadores selecionados são comuns ao lodo e à água de lavagem dos filtros, que são: IE 01, IE 06, IE 25, IE 26. Esses indicadores avaliam aspectos mais gerais, quanto à universalização e geração de resíduo (ID 01), impactos ambientais (IE 06), infraestrutura, gestão e planejamento (IE 25 e 26). Para o lodo, foram selecionados o IE 19, que trata da destinação do resíduo, e o IE 20, relacionado ao tratamento. Para a ALAF, foram selecionados os IEs 16 e 24, para tratamento e destinação, respectivamente. A Tabela 18 apresenta os indicadores estratégicos propostos.

Tabela 4733 - Indicadores estratégicos propostos para os resíduos gerados no tratamento de água – LETA e ALAF

Indicadores Estratégicos LETA (IEs)						Indicadores Estratégicos ALAF (IEs)					
universalização	Meio Amb.	Destinação		Gestão/ Planejamento/ Infraestrutura		universalização	Meio Amb.	Tratamento/ Destinação		Gestão/ Planejamento/ Infraestrutura	
IE 01	IE 06	IE 19	IE 20	IE 25	IE 26	IE 01	IE 06	IE16	IE24	IE25	IE26

IE 01- Atendimento da população com água tratada

IE 06- Ponto de captação protegido

IE 16- Porcentagem das etas que reusam / reciclam a alaf

IE 19- Porcentagem de etas que lançam o leta em corpos d'água

IE 20- Porcentagem das etas que realizam desaguamento do lodo

IE 24- porcentagem das etas que lançam a alaf em corpos d'água

IE 25- porcentagem de etas com mais de 50 anos de implantação

IE 26- porcentagem das etas que passaram por alguma reforma no decorrer dos anos de operação

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

#### 4.9. APLICAÇÃO DE INDICADORES ESTRATÉGICOS (IEs) NAS ETAs DA UGRHI 13

Os indicadores estratégicos propostos acima foram aplicados nas estações de tratamento de água de ciclo completo (ETAs) da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI 13) conforme apresentado na Tabela 19.

##### 4.9.1. Aplicação indicadores estratégicos gerais para LETA e ALAF

Os indicadores estratégicos propostos foram divididos em gerais, aqueles que são comuns a ambos os resíduos (LETA e ALAF) e indicadores aplicados ao LETA e a ALAF. A aplicação dos indicadores gerais avalia a geração destes resíduos de forma indireta, conforme apresentado na Tabela 19 abaixo.

Tabela 4734 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos gerais nas ETAs

Aplicação dos Indicadores Estratégicos Propostos Gerais nas ETAs													
Identificação		Indicadores Estratégicos Gerais Cenário Realista (IEs)				Indicadores Estratégicos Gerais Cenário futuro Otimista (IEs)				Indicadores Estratégicos Gerais Cenário Pessimista (IEs)			
		universalização	Meio Amb.	Gestão/ Planejamento/ Infraestrutura	Score de Análise Preditiva (SAP)	universalização	Meio Amb.	Gestão/ Planejamento / Infraestrutura	Score de Análise Preditiva (SAP)	universalização	Meio Amb.	Gestão/ Planejamento/ Infraestrutura	Score de Análise Preditiva (SAP)
Munic.	ETAs	IE 01 (%)	IE 06 SIM-1,0 NÃO- 1,5 *DND	IE 25 + IE 26 SIM- 0,8 NÃO- 1,2 *DND		IE 01 (%)	IE 06 SIM-1,0 NÃO- 1,5 *DND	IE 25 + IE 26 SIM- 0,8 NÃO- 1,2 *DND		IE 01 (%)	IE 06 SIM-1,0 NÃO- 1,5 *DND	IE 25 + IE 26 SIM- 0,8 NÃO- 1,2 *DND	
1	ETA 1	96,98%	1,50	0,8	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,5	0,80	1,2
	ETA 2		1,00	1,20	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,5	1,20	1,8
2	ETA 3	99,38%	1,00	1,20	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,5	1,20	1,8
	ETA 4		1,00	1,20	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,5	1,20	1,8
3	ETA 5	96,90%	*DND	*DND	IA	100,00%	*DND	*DND	IA	100,00%	*DND	*DND	IA
4	ETA 6	98,78%	1,50	0,8	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,5	0,80	1,2
5	ETA 7	100,00%	1,5	0,8	1,2	100,00%	1,00	0,8	0,8	100,00%	1,50	0,80	1,2
6	ETA 8	85,27%	*DND	*DND	IA	100,00%	*DND	*DND	IA	100,00%	*DND	*DND	IA

\* DND- Dado não disponibilizado

IA- Impossibilidade de aplicação

IE 01- Atendimento da população com água tratada

IE 06- Ponto de captação protegido

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O indicador IE 01 foi selecionado, pois, através deste, é possível avaliar de forma direta a questão da universalização (atendimento com água tratada) e, conseqüentemente, a geração de resíduo. Através dos dados levantados, percebe-se que os municípios ainda não cumprem o requisito da universalização, isso significa que em um cenário futuro vai aumentar o volume de água tratada, conseqüentemente refletirá no aumento da geração de resíduo.

O IE 06, visa avaliar questões ambientais que estão diretamente relacionadas à proteção dos recursos hídricos, que é a preservação da mata ciliar. A proteção dos pontos de captação de água pela mata ciliar é essencial para a manutenção da qualidade da água do manancial. Através dos cenários propostos, ficou mais evidente a influência deste indicador no cálculo do Score de Análise Preditiva (SAP), principalmente no cenário pessimista, onde simulou-se a ausência de proteção por mata ciliar, mantendo os outros indicadores iguais ao cenário realista, o que provocou uma mudança de cenário de algumas ETAs, evidenciando a vulnerabilidade dos mananciais pela ausência dessa vegetação.

Os indicadores IE 25 e 26 refletem a gestão, planejamento e infraestrutura das concessionárias. Através destes, é possível entender as ações tomadas em termos de planejamento, manutenção da infraestrutura e benfeitorias. Os resultados obtidos na fase de diagnósticos mostram que apenas metade das

estações de tratamento de água passam por alguma reforma ao longo da sua vida útil (maioria tem 50 anos ou mais). Este dado é crítico, pois ressalta um envelhecimento acentuado dos sistemas de tratamento de água e a urgência da adoção de medidas de planejamento, melhoria da infraestrutura e gestão mais eficazes.

#### 4.9.2. Aplicação indicadores estratégicos para LETA

Para avaliar o lodo, foram escolhidos os indicadores estratégicos (IEs 19 e 20), que avaliam diretamente este resíduo, no que diz respeito a destinação e tratamento, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 4735 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos para LETA nas ETAs

Aplicação dos Indicadores Estratégicos Propostos para LETA nas ETAs										
Identificação		Indicadores Estratégicos LETA Cenário Realista (IEs)			Indicadores Estratégicos LETA Cenário futuro Otimista (IEs)			Indicadores Estratégicos LETA Cenário Pessimista (IEs)		
		Destinação	Tratamento	Score de Análise Preditiva (SAP)	Destinação	Tratamento	Score de Análise Preditiva (SAP)	Destinação	Tratamento	Score de Análise Preditiva (SAP)
Munic.	ETAs	IE 19 SIM-1,5 NÃO- 1,0 *DND	IE 20 SIM-0,8 NÃO- 1,0 *DND		IE 19 SIM-1,5 NÃO- 1,0 *DND	IE 20 SIM-0,8 NÃO- 1,0 *DND		IE 19 SIM-1,5 NÃO- 1,0 *DND	IE 20 SIM-0,8 NÃO- 1,0 *DND	
1	ETA 1	1,0	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8
	ETA 2	1,50	1,00	1,5	1,00	0,80	0,8	1,50	1,00	1,5
2	ETA 3	1,00	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8
	ETA 4	1,00	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8	1,00	0,80	0,8
3	ETA 5	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA
4	ETA 6	1,50	1,00	1,5	1,00	0,80	0,8	1,50	1,00	1,5
5	ETA 7	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1
6	ETA 8	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA

\* DND- Dado não disponibilizado

IA- Impossibilidade de aplicação

IE 19-Lançamento do lodo em corpos d'água

IE 20- ETAs que realizam desaguamento do lodo

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Através do IE 19 que trata sobre a destinação do lodo é possível, de forma indireta, verificar impactos ao meio ambiente, devido ao lançamento de lodo nos corpos d'água, qualidade da água dos corpos hídricos, ausência de gestão de resíduos e de planejamento.

Os dados levantados com esse indicador mostram que ainda existem ETAs que lançam o lodo em corpos d'água. Além disso, através do cenário otimista, no qual foi adotado como critério que nenhuma estação lançaria o lodo no corpo hídrico, percebe-se a influência desta medida para as ETAs 2 e 6 (que faziam esse descarte) e mudaram o valor do score de análise preditiva, consequentemente mudaram sua faixa de classificação de ruim para ótimo (ETA 2) e ruim para bom (ETA 6).

Com o IE 20, pode-se avaliar o tratamento do lodo feito pelas estações de tratamento de água e o impacto desta adoção ou não, em termos ambientais, operacionais e financeiros. Através da análise dos dados do indicador, percebe-se que apenas 50% das ETAs adotam este tratamento. Esse dado torna-se ainda mais relevante ao olharmos para a estimativa de redução de volume de lodo com o emprego desta simples técnica. Isso sinaliza uma negligência em gestão de resíduos e financeira. Pois, a redução do volume de lodo poderia gerar menos custos de transporte e destinação final.

#### **4.9.3. Aplicação indicadores estratégicos para ALAF**

Os indicadores estratégicos propostos para avaliar a água de lavagem dos filtros (ALAF), foram os IEs 16 e 24. Estes indicadores tratam da gestão/planejamento e da destinação, respectivamente. A Tabela 21 apresenta a aplicação destes.

Tabela 4736 - Aplicação de indicadores estratégicos propostos para ALAF nas ETAs

Aplicação dos Indicadores Estratégicos Propostos para ALAF nas ETAs										
Identificação		Indicadores Estratégicos ALAF Cenário Realista (IEs)			Indicadores Estratégicos ALAF Cenário futuro Otimista (IEs)			Indicadores Estratégicos ALAF Cenário Pessimista (IEs)		
		Gestão/Planejamento	Destinação	Score de Análise Preditiva (SAP)	Gestão/Planejamento	Destinação	Score de Análise Preditiva (SAP)	Gestão/Planejamento	Destinação	Score de Análise Preditiva (SAP)
Munic.	ETAs	IE 16 RECIRCULAÇÃO-0,8 REUSO/ RECICLAGEM -0,4 NFN - 1,2	IE 24 SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND		IE 16 RECIRCULAÇÃO- 0,8 REUSO/ RECICLAGEM -0,4 NFN - 1,2	IE 24 SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND		IE 16 RECIRCULAÇÃO- 0,8 REUSO/ RECICLAGEM -0,4 NFN - 1,2	IE 24 SIM- 1,5 NÃO-1,0 *DND	
1	ETA 1	0,8	1,00	0,8	0,4	1,00	0,4	0,80	1,00	0,8
	ETA 2	1,2	1,5	1,8	0,8	1,00	0,8	1,20	1,50	1,8
2	ETA 3	1,2	1,00	1,2	0,8	1,00	0,8	1,20	1,00	1,2
	ETA 4	1,2	1,00	1,2	0,8	1,00	0,8	1,20	1,00	1,2
3	ETA 5	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA	*DND	0	IA
4	ETA 6	1,2	1,5	1,8	0,8	1,00	0,8	1,20	1,50	1,8
5	ETA 7	*DND	1,00	IA	*DND	1,00	IA	*DND	1,00	IA
6	ETA 8	*DND	*DND	IA	*DND	*DND	IA	*DND	0	IA

\* DND- Dado não disponibilizado

IA- Impossibilidade de aplicação

IE 16- ETAs que reusam / reciclam a alaf

IE 24- ETAs que lançam a alaf em corpos d'água

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O IE 24 refere-se à destinação da ALAF. Analisando este dado, verificam-se impactos ao meio ambiente, devido ao lançamento desse resíduo nos corpos d'água, qualidade da água dos corpos hídricos, ausência de gestão de resíduos e de planejamento.

Os dados levantados na fase de diagnóstico para esse indicador mostram que ainda existem ETAs que descartam a ALAF em corpos d'água. Através do cenário otimista, no qual foi adotado como critério que nenhuma estação lançaria a ALAF no corpo hídrico, percebe-se a influência desta medida para as ETAs 2 e 6 (que fazem esse descarte) e mudaram o valor do score de análise preditiva (SAP), consequentemente mudando de faixa de classificação de regular para bom (ETA 2) e péssimo para bom (ETA 6).

Através do IE 16, pode-se avaliar as alternativas de tratamento/destinação feitas pelas estações de tratamento de água e o impacto desta adoção ou não, em termos ambientais, operacionais e financeiros. Através da análise dos dados do indicador, percebe-se que aproximadamente 12% das ETAs fazem a recirculação da ALAF, que não é o tratamento ideal, porém é uma

alternativa de redução de impacto ambiental. Quanto ao reuso/recirculação, nenhuma das ETAs estudadas adota essas práticas. Esse dado torna-se ainda mais relevante ao olharmos para o cenário otimista, no qual foi adotado para a ETA 1 o reuso e para as demais que não faziam nada, recirculação. Essa alteração contribuiu para a melhora do valor do SAP e, conseqüentemente, na mudança de faixa de classificação de todas as ETAs para melhores situações.

Em suma, foram escolhidos 06 indicadores para cada resíduo, a saber:

- Para o LETA – IEs 01, 06, 19,20,25 e 26;
- Para a ALAF – IEs 01, 06, 16,24,25 e 26.

Portanto, os indicadores estratégicos que propusemos têm como objetivo abranger todos os aspectos relacionados à gestão de resíduos gerados no tratamento de água. Permitindo uma análise aprofundada desde a geração até sua destinação, tratamento e planejamento como um todo.

O principal objetivo com esses indicadores é propiciar aos gestores uma ferramenta que possibilite identificar obstáculos, otimizar processos e traçar um planejamento estratégico mais eficaz e sustentável para a gestão desses resíduos.

## **5. CONCLUSÕES**

Conforme exposto nesta pesquisa, os resíduos gerados no tratamento de água constituem um problema complexo, que exige uma abordagem diversificada, envolvendo gestão, planejamento, meio ambiente e outros aspectos.

O uso de indicadores como ferramenta de análise dos resíduos gerados no tratamento de água possibilitou a realização de um diagnóstico das estações de tratamento de água que operam em ciclo convencional na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê – Jacaré (UGRHI 13). Através da aplicação destes indicadores, foi possível identificar a situação em que se encontra cada ETA e a indisponibilidade ou ausência de dados quantitativos por estas ETAs.

Através da aplicação de técnicas de análise preditiva e cenários futuros, foi feito um diagnóstico da situação dos corpos hídricos da UGRHI 13 com o objetivo de correlacionar a qualidade da água do manancial e a geração de resíduos. Os resultados mostraram uma tendência de queda na qualidade da água dos corpos hídricos e a deficiência de pontos de monitoramento dentro da bacia hidrográfica voltados para a qualidade da água para abastecimento público, evidenciando que o monitoramento está mais relacionado com a qualidade da água dos corpos receptores que recebem lançamento de efluentes líquidos do que do próprio manancial de abastecimento de água.

A construção dos cenários teve como objetivo realizar um diagnóstico (cenário realista) e um prognóstico (pessimista e otimista). A aplicação da análise multicritério possibilitou quantificar os dados qualitativos, por meio de critérios estabelecidos para indicadores, que resultaram no Score de Análise Preditiva (SAP).

Através dos resultados obtidos com a aplicação do SAP sobre o volume de resíduos gerados, foi possível mensurar o impacto deste score de análise preditiva no volume de resíduo gerado, bem como, através da matriz de estratificação adotada, foi possível classificar a situação de cada estação de tratamento, baseado no SAP.

O cenário realista embasou a elaboração dos demais (pessimista e otimista), modificando os critérios dos indicadores escolhidos e adotando dados da literatura. Os resultados mostram que pequenas mudanças de gestão, como a preservação dos pontos de captação pela mata ciliar, não lançar o resíduo nos corpos d'água e a adoção de técnicas simples e pouco onerosas como o desaguamento, são medidas que melhoram significativamente a situação de uma estação de tratamento de água, refletindo inclusive em uma reclassificação positiva dessas ETAs.

A comparação dos cenários de geração de resíduos, baseada nos volumes finais calculados para o ano de 2035, teve como objetivo visualizar em termos percentuais essa variação de volume entre os cenários. Os resultados indicaram algumas variações de volume bem relevantes. Para algumas estações de tratamento de água, o aumento de volume foi da ordem de 200% em termos percentuais, indicando uma geração de três vezes maior de resíduo.

A fim de melhorar a gestão das estações de tratamento de água (ETAs) e garantir a confiabilidade dos resultados, é essencial realizar um diagnóstico frequente. O que envolve uma coleta periódica de dados, permitindo uma avaliação contínua da situação do sistema e a construção de um banco de dados robusto. Essa prática eleva a precisão das análises e fundamenta decisões mais assertivas.

No âmbito da pesquisa científica, recomenda-se estender os estudos para outras ETAs. A implementação de diagnósticos e prognósticos nessas estações é crucial para identificar os principais entraves na gestão dos resíduos gerados no tratamento de água. Essa abordagem comparativa pode revelar padrões e inspirar soluções inovadoras para desafios recorrentes.

Por fim, este estudo destaca-se por sua abordagem inovadora, ao aplicar técnicas de análise preditiva e cenários futuros adaptados para os resíduos de tratamento de água, como o Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) e a Água de Lavagem de Filtros (ALAF), com um horizonte temporal de dez anos (até 2035).

A principal limitação desta pesquisa foi a escassez de dados fornecidos ou disponibilizados pelas concessionárias, com ênfase particular em relação a geração de lodo (LETA) e água de lavagem dos filtros (ALAF).

Adicionalmente, observou-se que a prioridade dos órgãos ambientais (como a CETESB) está mais voltada para o monitoramento dos corpos receptores de efluentes, em detrimento dos pontos de captação de água. Esse desequilíbrio é notório, visto que a rede de monitoramento da CETESB possui apenas um ponto localizado no manancial de captação em toda a UGRHI 13.

Como sugestão de pesquisa futura, recomendasse um estudo de validação dos critérios adotados para os indicadores baseado na análise multicritério para elaboração dos cenários. Realizar uma análise espacial e temporal detalhada da rede de monitoramento da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 13) em relação aos pontos de captação de água para abastecimento público (mananciais). Analisar a aplicação e eficácia dos indicadores estratégicos propostos como uma ferramenta de planejamento estratégico para a gestão de resíduos oriundos do tratamento de água.

## 6. REFERÊNCIAS

Abreu Terra, J. V. F.; Oliveira, V. P. S.; De Oliveira Nunes, C. R., De Rezende Araújo, T. M. Análise de qualidade de água no município de São João da Barra-RJ. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 36–47, 2024. DOI: [10.19180/2177-4560.v18n22024p36-47](https://doi.org/10.19180/2177-4560.v18n22024p36-47). Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/23418>.

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. **Residues of water treatment plants and ISO 24512: challenge of the Brazilian sanitation.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 115-122, APR-JUN, 2013. ISSN 1413-4152.

Andreoli, C. V. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

Aparecida de Oliveira, C.; França Barcelo, W.; Gomes Colares, C. J. ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTRO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA FINS DE REAPROVEITAMENTO. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [S. l.], v. 9, n. 11, 2013. DOI: [10.17271/198008279112013665](https://doi.org/10.17271/198008279112013665). Disponível em: [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum\\_ambiental/article/view/665](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/665).

Araújo, A. P. M. **Avaliação operacional e características do lodo gerado na indústria da água do litoral sul de Pernambuco**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

Araújo de Melo, L.; Sautter, Kl. D.; Janissek, P. R. Estudo de cenários para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos de Curitiba. **Scenario studies for the management of urban solid waste in Curitiba**. [S.l.: S.n.]. 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 24512: Serviços de água potável e de esgoto - Diretrizes para a gestão dos prestadores de serviços e para a avaliação do desempenho. Rio de Janeiro, 2012.

Bettarello, F. J.; Turazza, D. N.; Oliveira, A. P.; Bettarello, E. J.; Neto, A. J. M. Projetando o futuro: estratégias baseadas em cenários prospectivos para uma empresa metalúrgica. **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, v. 24, n. 1, p. e25762, 3 fev. 2025.

Bispo, U. J. S. **Análise multicritério dos serviços de saneamento da microrregião de Catolé do Rocha – PB**. Trabalho de conclusão de curso, bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia Agroalimentar, Pombal, 2023.

Brasil. Constituição da República Federativa do Brasil, 1988. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 20 jan. 2025.

Brasil. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2022. Altera o Anexo XCV 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. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html). Acesso em: 20 jan. 2025.

Brasil. LEI 6938- POLITICA NACIONAL DO MEIO AMBIENTE -1981. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm)>.

Brasil. Lei 9605- lei de crimes ambientais 1998. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm)>.

Brasil. LEI Nº 11445 - DIRETRIZES NACIONAIS PARA O SANEAMENTO BASICO Lei nº 11445, de 5 de janeiro de 2007. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)

Brasil. POLITICA NACIONAL DE RECURSOS HIDRICOS LEI 9.433- 1997. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)>.

Brasil. POLITICA NACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS - LEI 12305-2010  
No. BRASIL, 2010: [S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>.

Brasil. POLITICA NACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS - LEI 12305-2010  
No. BRASIL, 2010: [S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>.

Brasil. LEI 14026- MARCO LEGAL DO SANEAMENTO -2020. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm)>.

Brasil. Resolução CONAMA nº 237 - 1997. 1997b.

Campos, M. CD. Influência da recirculação de água de lavagem de filtros na qualidade da água para consumo humano. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas–SP.

Castro, A. Soluções para tratamento de resíduos de estações de tratamento de água- Proposta para a unidade de tratamento e recuperação de resíduos - UTR de Rio das Velhas na RMBH. 19o Congresso Brasileiros de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.

Cintra Junior, W. A.; Machado Neto, A. J. Prospecção de cenários para o saneamento básico no Brasil: um olhar sobre o novo marco legal do setor. In: **Anais do IFBAE**, 2020.

Cornwell, D.; R. Lee. Recycle stream effects on water treatment. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1993.

Costa, C. W.; Dupas, F. A.; Cespedes, J. G.; Silva, L. F. MONITORAMENTO DA EXPANSÃO URBANA. CENÁRIOS FUTUROS DE CRESCIMENTO POPULACIONAL E O CONSUMO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SÃO CARLOS- SP. **Geociências**. 2013.

Da Costa A. J. C. **Análise de viabilidade da utilização de lodo de ETA coagulado com Cloreto de Polialumínio (PAC) composto com areia como agregado miúdo em concreto para recomposição de calçadas** - Estudo de caso na ETA do município de Mirassol-SP. São Carlos, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos.

De Sousa, A. A. R.; Dantas, J.; Pereira, L. V. B.; Da Silva, K. C. G. LODOS DE ETA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA E SISTEMÁTICA SOBRE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA PARA BIOPRODUTOS E SUSTENTABILIDADE. **ARACÊ**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 14654–14677, 2025. DOI: [10.56238/arev7n3-260](https://doi.org/10.56238/arev7n3-260). Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/4059>.

Dos Santos, L. A. R.; Santos Michelan, D. C. G.; De Jesus, T. M. VERIFICATION OF THE PRODUCTION OF WTP SLUDGE AS A FUNCTION OF THE QUANTITY AND QUALITY OF RAW WATER. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 15, n. 2, p. 235–258, 2021.

Dutra de Oliveira, M.; Vianna, G. P.; Tonani, I. A.; Nunes, V. R. I-978 – Resíduos de Estações de Tratamento de Água: Uma Revisão Bibliográfica sobre Qualidade e Uso Sustentável no Brasil. In **Anais. 32º Congresso da ABES**. 2023.

Evans, J. R.; Lindner, C. H. Business analytics: The next frontier for decision sciences. Lindner College of Business, University of Cincinnati. 2018.

Farias, N. V. **Avaliação do desempenho de uma ETA através, da aplicação de indicadores de qualidade**. Criciúma/SC, 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2020.

Fiore, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. Qualidade de água superficial e geração de lodos em estações de tratamento de água. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 15, n. 5, 2020.

Frazão, C.; Braga, C.; Ribeiro, M. R. por Múltiplos Critérios e Decisores de Alternativas de Gerenciamento da Demanda de Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 11, issue 1, pp. 37-49. 2006.

Gandolphi, C. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA, São Carlos, 2023.

Gandomi, A.; Management, M. Haider-International journal of information; 2015, undefined. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. ElsevierA Gandomi, M Haider. **International journal of information management**, 2015

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA CETESB-COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2023.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA CETESB-COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. [S.l.: S.n.].

Ismail, I. A. L.; Dantas, A. D. B.; Paschoalato, C. F. P. R.; Pires, E. C. AVALIAÇÃO E VIABILIDADE DE RECIRCULAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO. In **Anais. 32º Congresso da ABES**. 2023.

Iezzi, Gelson *et al.* Matemática: Ciência e Aplicações. pág. 20, 5º ed. São Paulo: Saraiva, 201.

Januário, G. F.; Seckler, S.; Filho, F. PLANEJAMENTO E ASPECTOS AMBIENTAIS ENVOLVIDOS NA DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO PLANNING AND ENVIRONMENTAL ASPECTS INVOLVED IN THE FINAL DISPOSAL OF SLUDGE FROM WATER TREATMENT PLANTS IN THE METROPOLITAN AREA OF SAO PAULO Engenharia Civil pela EPUSP (1992). Mestre em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela EPUSP (2005). Engenharia da SABESP NOTA TÉCNICA RESUMOEng. sanit. ambient. [S.l.: S.n.].

Jat, M. K.; Garg, P. K.; Khare, D. Monitoring and modlling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Apllied Earth Observation and Geoinformation**, v. 10, n. 1, p. 26–43, 2008.

Jensen, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

Junior Taboni, L. R., Campos Martins, D. C., Scandelai, A. P. J.; Junior Costa, V. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO FINAL DE LODO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ESTUDO DE CASO NA ETA DE MARINGÁ. [S.l.: S.n.]. 2019.

Katayama, V. T.; Montes, C. P.; Ferraz, T. H.; Morita, D. M. Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica. **Revista Ambiente & Água**, v. 20, n. 2, p. 559-570, 2015.

Kawamura, S. **Integrated design and operation of water treatment facilities**. 2. ed. New York: [S.n.]. 1991.

Landa, G. G.; Valfré, A. R.; Souza, S. S. Avaliação do Índice de Qualidade de Água na Represa do Córrego Sete de Setembro, na Cidade de Nanuque, Estado de Minas Gerais (MG), Brasil. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 3, p. e8814348508, 24 mar. 2025.

LNEC - Laboratório de engenharia civil. 2020.

López, E.; Bocco, G.; Mendonza, M; Duau, E. Predicting land- cover and land use change in the urban fringe. A case in moreliacity, Mexico. **Mexico: landscape and urban planning**, v. 55, 2001.

Martins, A.; Parada Reina, V.; Silva, M. C. A. TEOR DE SÓLIDOS E MANEJO DE LETA DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO. **Conference: 1º Encontro Nacional de Lodo de Estações de Tratamento de Água**. 2021.

Matos, R. INDICADORES DE DESEMPENHO PARA SERVIÇOS DE ÁGUAS RESIDUAIS LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL **International Water Association**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.iwap.co.uk>. 2005.

Menezes, J. M.; Prado, R. B.; Silva Júnior, G. C.; Santos, R. T. ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS MÉTODOS E APLICABILIDADE. 2010.

Messa, G. N.; Jesus, A. M. D.; Fiore, F. A. Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource: Potential and limitations. **Resources, Conservation and Recycling AdvancesElsevier**. 2025.

Minatel, M. M.; Achon, C. L.; Reis, R. F. Ensaios controlados para análise de desaguamento de lodo de ETA em leitos de drenagem: influência do teor de sólidos. **Revista de Departamento de Águas e Esgotos**, v. 72, n. 245, p. 1–14, 2024.

Ministério das Cidades. Avaliação regional dos serviços de manejo de resíduos sólidos municipais. Informe analítico da situação da gestão municipal de resíduos sólidos no Brasil 2002. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental Programa de Modernização do Setor de Saneamento: São Paulo, 2003.

Molina, T.; Santos, H. R. Caracterização e tratamento de água de lavagem de filtros de ETA, com o uso de polímeros sintéticos e amido de batata. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, p. 28-44, 2010. Disponível em: <https://revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/11312#:~:text=Conclui-se%20que%20a%20C3%A1gua,para%20o%20processo%20da%20ETA.>

Monteiro, E.D.V. Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 223-230, 2006.

Moreira, R. C. A.; Guimarães, E. M.; Boaventura, G. ESTUDO GEOQUÍMICO DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM ÁREA DEGRADADA. **Química Nova**. 2009.

Organização das Nações Unidas. Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova Iorque, 2015.

Paes, N.X. et al. Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município de Curitiba. Secretaria Municipal do Meio Ambiente/ Departamento de Limpeza Pública: Curitiba, 2007.

Pereira, R. F.; Feitosa, A. V.; Nunes, A. I. V.; Castro, M. A. H.; Paulino, W. D. Análise de sensibilidade dos parâmetros do índice de qualidade de água (IQA). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais... Bento Gonçalves: SBRH, 2013. p. 1-8.

Quaresma, J.B. Proposta para tratamento dos resíduos sólidos na cidade de Monte Alegre. Ministério de Minas e Energia e Governo do Estado do Pará: Monte Alegre, 1998

Reali, M. A. P. NOÇÕES GERAIS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA. [S.l.: S.n.]. 1999.

Reali. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS QUANTITATIVAS E QUALITATIVAS DO LODO DE ETAS. [S.l.: S.n.]. 1999.

Richter, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. 1ª edição ed. [S.l.]: blucher, 2001.

Roth, D. K.; Cornwell, D.A.; Russel, J. S.; Gross, M.; Malmrose, P. E.; Wancho, L. Implementing residuals management : costs implication for coagulation and softening plants. **JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION**, v. 3, p. 81–93, mar. 2008.

Silva, L. R. d. Gestão de resíduos gerados no tratamento de água: Diagnóstico, desafios e oportunidades para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ). 2021. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1166424>.

Silva, L. R. **Gestão de resíduos gerados no tratamento de água: diagnóstico, desafios e oportunidades para a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ)**. Campinas, 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.

Sousa, D. A.; Jesus, N. C. de; Viana, J. R.; Carvalho, C. C. A.; Oliveira, R. M. M. Caracterização do lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de

Balsas - Maranhão e aplicação como agregado miúdo em argamassa. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. e7888, 2025. DOI: 10.55905/cuadv17n4-002. 2025.

Tavares, R. C. Composição gravimétrica: uma ferramenta de planejamento e gerenciamento do resíduo urbano de Curitiba e região metropolitana. – Instituto de Engenharia do Paraná, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2007.

Tsutiya, M. T.; Hirata, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. *In: ANAIS JOÃO PESSOA: ABES* (org.). mar. 2001.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). Municipal solid waste in the United States: 2005 facts and figures, executive summary. 2005.

Urban, R. C.; Isaac, R. L.; Morita, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, p. 128–158, 2019.

Vale, M. e ACHON. C. Estudo aplicabilidade de indicadores para gestão de resíduos gerados em ETAs. 2016.

Waller, Matthew A.; Fawcett, Stanley E. Click here for a data scientist: Big data, predictive analytics, and theory development in the era of a maker movement supply chain. **Journal of Business Logistics**, v. 34, n. 4, p. 249–252, 2013.

Yule Queiroz de Oliveira, I. ASPECTOS CONCEITUAIS RELACIONADOS À QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA E O VOLUME DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA GERADO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 112, 2017.

Yule Queiroz de Oliveira, I. Costa Rondon, O. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **Interações**, Campo Grande, v. 17, n. 4, 2016. Disponível em: <https://interacoesucdb.emnuvens.com.br/interacoes/article/view/746>.

## APÊNDICE A - QUESTIONÁRIO DE PESQUISA - PESQUISA SOBRE RESÍDUOS GERADOS EM ETAS

1. Qual a ETA?

2. As propriedades da água bruta variam muito?

Marcar apenas um oval.

sim  Não

- 
3. Qual o volume de água tratada?  
\_\_\_\_\_
  4. Qual o coagulante utilizado e a sua dosagem?  
\_\_\_\_\_
  5. Como é feita a remoção do lodo dos decantadores?  
\_\_\_\_\_
  6. Qual a frequência de limpeza dos decantadores?  
\_\_\_\_\_
  7. Qual o volume de lodo gerado nos decantadores?  
\_\_\_\_\_
  8. Qual a destinação do lodo dos decantadores?  
\_\_\_\_\_
  9. Existe algum tratamento para LETA?  
\_\_\_\_\_
  10. Quantos filtros existem na ETA?  
\_\_\_\_\_
  11. Qual a carreira de filtração?  
\_\_\_\_\_
  12. Qual o volume da água de lavagem dos filtros (ALAF)?  
\_\_\_\_\_
  13. Qual o destino da água de lavagem dos filtros?  
\_\_\_\_\_
  14. Existe algum tratamento para ALAF?  
\_\_\_\_\_
  15. Existem dados de consumo de energia elétrica e água para a remoção ou tratamento de LETA e ALAF?  
\_\_\_\_\_
  16. Existem ensaios de caracterização dos resíduos gerados na eta, como por exemplo: ph, solidos, etc.  
\_\_\_\_\_
  17. É possível nos fornecer dados dos ensaios de caracterização da água bruta?  
\_\_\_\_\_

*Marcar apenas um oval.*

sim  Não

18. Existe projeção do aumento da demanda de água tratada e geração de resíduo para algum horizonte/ ano?

*Marcar apenas um oval.*

sim  Não

## **ANEXO A – PARECER DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA - CEP**



UFSCAR - UNIVERSIDADE  
FEDERAL DE SÃO CARLOS



## PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

### DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

**Título da Pesquisa:** Uso de Indicadores de Desempenho para Gestão de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto Baseado na NBR ISO 24511:2012

**Pesquisador:** CAROLINE GANDOLPHI

**Área Temática:**

**Versão:** 1

**CAAE:** 54169521.6.0000.5504

**Instituição Proponente:** Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

**Patrocinador Principal:** Financiamento Próprio

### DADOS DO PARECER

**Número do Parecer:** 5.249.108

#### Apresentação do Projeto:

As informações elencadas nos campos "Apresentação do Projeto", "Objetivo da Pesquisa" e Avaliação dos Riscos e Benefícios" foram extraídas do arquivo Informações Básicas da Pesquisa (PB\_INFORMAÇÕES\_BÁSICAS\_DO\_PROJETO\_1862803, de 20/11/2011) e/ou do Projeto Detalhado (USO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA GESTÃO DE LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO BASEADO NA NBR ISO 24511:2012, de Nov/2021):

**RESUMO:** Como parte integrante dos serviços de saneamento básico, o tratamento de esgoto ocorre nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) e tem objetivo de reduzir o potencial poluidor do esgoto bruto, atendendo aos parâmetros legais para descarte final dos efluentes. Um dos subprodutos gerados nas ETEs é o lodo de esgoto, que requer tratamento adicional, que facilita seu manuseio, transporte e a preparação para reutilização. A norma NBR ISO 24511/2012 recomenda o uso de indicadores de desempenho como ferramenta para medir a eficiência do tratamento. Essa pesquisa pretende avaliar a gestão do lodo produzido em ETEs, por meio de indicadores de desempenho que estejam de acordo com esta norma. Para tanto, será realizada pesquisa para embasamento teórico sobre a gestão do lodo gerado em ETEs, seguida da seleção de indicadores aplicáveis para a gestão do lodo, e aplicação em três ETEs. A coleta de dados dar-se-á por meio de formulário submetido de forma remota aos responsáveis pela ETE, com base nos quais, pretende-se obter um conjunto de indicadores de desempenho adaptáveis para a gestão do

**Endereço:** WASHINGTON LUIZ KM 235

**Bairro:** JARDIM GUANABARA

**UF:** SP

**Telefone:** (16)3351-9685

**Município:** SAO CARLOS

**CEP:** 13.565-905

**E-mail:** cephumanos@ufscar.br



Continuação do Parecer: 5.249.108

lodo produzido em ETEs brasileiras e uma análise das principais dificuldades associadas à sua aplicação.

**HIPÓTESE:** Através do desenvolvimento dessa pesquisa espera-se determinar que é possível definir um conjunto de indicadores de desempenho que podem avaliar de forma eficiente a gestão do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto, com formulações que possam ser adaptáveis à diferentes realidades, conforme preconiza a ISO 24511. Para isso, serão selecionados em meio a literatura existente indicadores utilizados com essa finalidade, a serem adaptados e complementados para atender ao objetivo dessa pesquisa.

Posteriormente, pretende-se verificar a aplicabilidade de um conjunto de ID (indicadores de desempenho) pré-selecionados na literatura para avaliação da gestão do lodo em ETEs. E que os dados operacionais fornecidos estejam de acordo com as prescrições da NBR ISO 24511/2012, no que se refere a verificação do grau de confiança de cada dado/variável usada no cálculo dos indicadores, em termos de confiabilidade e exatidão.

**METODOLOGIA, CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO:**

A metodologia se divide em três etapas: Para alcançar os objetivos propostos a pesquisa será desenvolvida através das seguintes etapas: (1) Embasamento teórico sobre gestão do lodo de esgoto e uso de indicadores de desempenho, por meio de pesquisa bibliográfica; (2) Análise e compilação de um conjunto de indicadores de desempenho com base em dados da literatura e elaboração do formulário a ser aplicado em três ETEs do estado de São Paulo; (3) Coleta de dados, através do Anexo I – Formulário para Coleta de Dados, enviado aos gestores de três Estações de Tratamento de Esgoto, alvo dessa pesquisa. A metodologia e formulário serão previamente encaminhados para apreciação e aprovação do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP). A aplicação do formulário será realizada de forma remota, através de e-mail e a comunicação, para sanar eventuais dúvidas, será via telefone ou Google Meet. Os participantes serão funcionários ou representantes das administradoras das ETEs, que possuam acesso às informações solicitadas, a serem indicados pela própria empresa. Será realizado contato prévio via telefone ou e-mail para indicação do participante, verificação de sua disponibilidade e determinação dos canais de comunicação mais adequados.

O objetivo da aplicação do formulário é a coleta de dados operacionais referentes às ETEs, portanto a inclusão de participantes deverá considerar os seguintes critérios:

<b>Endereço:</b> WASHINGTON LUIZ KM 235	<b>CEP:</b> 13.565-905
<b>Bairro:</b> JARDIM GUANABARA	
<b>UF:</b> SP	<b>Município:</b> SAO CARLOS
<b>Telefone:</b> (16)3351-9685	<b>E-mail:</b> cephumanos@ufscar.br



Continuação do Parecer: 5.249.108

- Ter conhecimento técnico a respeito da operação da ETE;
- Ter acesso aos dados operacionais da ETE.

O participante deverá ser substituído na pesquisa sempre que for observado:

- Indisponibilidade para responder o formulário;
- Não ter acesso aos dados operacionais da ETE necessários para a pesquisa.

#### **Objetivo da Pesquisa:**

O objetivo primário desta pesquisa é avaliar a viabilidade do uso de um conjunto de indicadores de desempenho para auxiliar a avaliação da gestão do lodo produzido em Estações de Tratamento de Esgoto – ETE, de acordo com os preceitos da NBR ISO 24511/2012.

Como objetivos secundários, enumeram-se:

- Analisar e compilar um conjunto de indicadores de desempenho adaptáveis para aplicação na gestão do lodo gerado em ETEs brasileiras.
- Analisar a viabilidade de aplicação de um conjunto de indicadores de desempenho pré-determinado.
- Analisar a aplicação e o grau de confiança dos indicadores de desempenho de acordo com as recomendações da NBR ISO 24511/2012.

#### **Avaliação dos Riscos e Benefícios:**

O preenchimento do formulário ao qual o participante será submetido não lhe oferece risco imediato, porém considera-se a possibilidade de ocorrência de desconforto diante da impossibilidade de acesso às informações solicitadas.

Com o desenvolvimento da pesquisa, será elaborado um conjunto de indicadores de desempenho que possa ser utilizado e/ou adaptado para avaliação da gestão do lodo de esgoto produzido em Estações de Tratamento, que ficarão disponíveis na literatura para aplicação com as devidas adaptações e avaliação de ETEs brasileiras com diferentes tecnologias de tratamento.

Através da aplicação dos indicadores nas ETEs alvo dessa pesquisa, avaliando o grau de confiança dos IDs de acordo com as recomendações da NBR ISO 24511/2012, a pesquisa contribuirá com a difusão das diretrizes estabelecidas pela norma, definidas para avaliar e aprimorar a gestão dos serviços de esgoto. Inteirando os interessados dos propósitos globais relativos aos serviços de saneamento básico e redução de impacto ambiental gerado pelas atividades humanas.

**Endereço:** WASHINGTON LUIZ KM 235  
**Bairro:** JARDIM GUANABARA **CEP:** 13.565-905  
**UF:** SP **Município:** SAO CARLOS  
**Telefone:** (16)3351-9685 **E-mail:** cephumanos@ufscar.br



Continuação do Parecer: 5.249.108

**Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:**

Trata-se de uma pesquisa estritamente técnica, cuja coleta de dados e preenchimento do formulário não inclui aspectos individuais. Sendo assim, não está sujeita à Resolução CNS nº 466/2012 suas complementares, ou mesmo na CNS nº 510 de 2016 e suas complementares. Os profissionais que responderão ao questionário sugerido apenas serão responsáveis pela coleta e transmissão de dados técnicos a respeito do processo, não se caracterizando, portanto, como "participantes em pesquisa".

Vide, por exemplo, Resolução CNS 510 de 2016, Artigo1, Parágrafo único, inciso VII

"VII - pesquisa que objetiva o aprofundamento teórico de situações que emergem espontânea e contingencialmente na prática profissional, desde que não revelem dados que possam identificar o sujeito;"

**Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

Vide campo "Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações"

**Recomendações:**

Vide campo "Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações"

**Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

Agradecemos as providências e os cuidados tomados pelos pesquisadores ao apresentarem a 1ª versão do protocolo de pesquisa ao CEP da UFSCar. Conforme entendimento do parecerista, não há necessidade de registro da pesquisa e seus protocolos pelo sistema CEP/CONEP.

**Considerações Finais a critério do CEP:**

Diante do exposto, o Comitê de ética em pesquisa - CEP, de acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS nº 510 de 2016, manifesta-se por considerar que não há necessidade de registro ou avaliação da pesquisa e seus protocolos pelo sistema CEP/CONEP. Esta manifestação não exime os pesquisadores de submeterem novas propostas ao CEP/CONEP caso haja mudanças significativas nas metodologias e instrumentos desta pesquisa ou em propostas futuras.

**Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:**

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
----------------	---------	----------	-------	----------

Endereço: WASHINGTON LUIZ KM 235  
 Bairro: JARDIM GUANABARA CEP: 13.565-905  
 UF: SP Município: SAO CARLOS  
 Telefone: (16)3351-9685 E-mail: cephumanos@ufscar.br



Continuação do Parecer: 5.249.108

Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1862803.pdf	24/11/2021 22:15:59		Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Detalhado.pdf	24/11/2021 22:08:27	CAROLINE GANDOLPHI	Aceito
Outros	Formulario.pdf	24/11/2021 21:59:07	CAROLINE GANDOLPHI	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE.pdf	24/11/2021 21:58:55	CAROLINE GANDOLPHI	Aceito
Folha de Rosto	Folha_de_Rosto.pdf	24/11/2021 21:58:17	CAROLINE GANDOLPHI	Aceito

**Situação do Parecer:**

Retirado

**Necessita Apreciação da CONEP:**

Não

SAO CARLOS, 17 de Fevereiro de 2022

---

**Assinado por:**  
**Adriana Sanches Garcia de Araújo**  
 (Coordenador(a))

**Endereço:** WASHINGTON LUIZ KM 235

**Bairro:** JARDIM GUANABARA

**CEP:** 13.565-905

**UF:** SP

**Município:** SAO CARLOS

**Telefone:** (16)3351-9685

**E-mail:** cephumanos@ufscar.br