

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Klessia Francyni da Silva Lima

**Caracterização e potenciais aplicações de bioossólidos: Estudo sobre
reciclagem e estratégias de gestão em Estações de Tratamento de Esgoto**

Maceió

2024

Klessia Francyni da Silva Lima

**Caracterização e potenciais aplicações de bio sólidos: Estudo sobre
reciclagem e estratégias de gestão em Estações de Tratamento de Esgoto**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal de
Alagoas, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Gomes
Barboza

Coorientadora: Professora Dra. Ivete
Vasconcelos Lopes Ferreira

Maceió

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Maria Helena Mendes Lessa – CRB-4 – 1616

L732c Lima, Klessia Francyni da Silva.
 Caracterização e potenciais aplicações de bioossólidos : estudo sobre
reciclagem e estratégias de gestão em estações de tratamento de esgoto / Klessia
Francyni da Silva Lima. – Maceió, 2025.
 60 f. : il., tabs. color.

Orientador: Márcio Gomes Barboza.
Coorientadora: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e
Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió,
2024.

Bibliografia: f. 53-55.

Anexos: f. 56-60.


1. Resíduos sólidos. 2. Esgoto Sanitário – Tratamento. 3. Estação de
Tratamento de Esgoto (ETE). I. Título.

CDU: 628.32


AUTOR: KLESSIA FRANCYNI DA SILVA LIMA

Caracterização e potenciais aplicações de biossólidos: Estudo sobre reciclagem e estratégias de gestão em Estações de Tratamento de Esgoto

Plano de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.


Documento assinado digitalmente
 **MARCIO GOMES BARBOZA**
Data: 06/12/2024 13:45:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Marcio Gomes Barboza - Universidade Federal de Alagoas
(Orientador)


Documento assinado digitalmente
 **IVETE VASCONCELOS LOPES FERREIRA**
Data: 07/12/2024 15:27:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professora Dra. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira (Coorientadora)

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **KARINA RIBEIRO SALOMON**
Data: 07/12/2024 20:51:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon - Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMORIM**
Data: 09/12/2024 11:51:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Eduardo Lucena C. de Amorim - Universidade Federal de Alagoas

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, a quem dedico toda a honra e glória pela conquista deste momento. Foi com Sua força que percorri este caminho e alcancei esta realização.

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco Lima (*in memoriam*) e Iracema Lima, que me guiaram com perseverança e amor, enfrentando as dificuldades para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Agradeço também à minha irmã, Klarissa Lima, por sua alegria e incentivo ao longo desta jornada.

Aos meus professores da graduação, expresso meu profundo reconhecimento pelo conhecimento e dedicação que enriqueceram minha trajetória acadêmica. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Barboza, pelo tempo e esforço investidos na orientação deste trabalho. Também gostaria de agradecer à coorientadora, Prof. Dra. Ivete Vasconcelos, por sua valiosa contribuição e apoio ao longo deste processo. Ao PET Ambiental, sou grata por me proporcionar um verdadeiro sentimento de pertencimento à Universidade.

Quero expressar minha profunda gratidão aos amigos que estiveram comigo ao longo da graduação e que foram essenciais em cada etapa dessa jornada. Bárbara Lima, Erakthlyn Melquiades, Júlia Vitória, Kevin Lins, Louise Sampaio, Mariana Lessa e Tálison Barros, cada um de vocês tem um lugar especial na minha história, com lembranças e apoio que sempre me fortaleceram. Sem vocês, essa caminhada teria sido muito mais difícil.

Também gostaria de agradecer aos amigos de fora da faculdade, como Geovane Cavalcante e Shelda Azevedo, que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores. A todos vocês, minha gratidão eterna por serem parte dessa conquista.

Por fim, agradeço à Companhia de saneamento pela disponibilização dos dados da ETE, essenciais para a concretização deste TCC.

RESUMO

O tratamento de esgoto é um processo fundamental para a preservação do meio ambiente e da saúde pública. No entanto, esse processo gera subprodutos sólidos que precisam ser adequadamente tratados ou reaproveitados para evitar impactos negativos no meio ambiente e na saúde coletiva. O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) propõe alternativas de reutilização dos subprodutos sólidos de uma ETE para reduzir os custos de disposição e contribuir para a sustentabilidade. A metodologia envolveu uma revisão bibliográfica sobre processos de tratamento e destinação de resíduos sólidos, além da caracterização dos resíduos gerados, como o lodo. A caracterização abrangeu tanto aspectos físicos e químicos dos subprodutos quanto sua adequação para reutilização. Nos resultados, a pesquisa indicou uma eficiência média de 93,87% na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e de 86,25% na redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO), demonstrando a efetividade do tratamento de esgoto na ETE estudada. Em relação ao lodo, observou-se que o uso de polímeros melhorou a eficiência na desidratação, permitindo uma consistência mais sólida e facilitando a manipulação e o transporte. Foi destacada também a viabilidade do uso agrícola do lodo como fertilizante, desde que tratados para reduzir patógenos e minimizar riscos ambientais.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Reaproveitamento; Estação de Tratamento de Esgoto.

ABSTRACT

Sewage treatment is a fundamental process for preserving the environment and public health. However, this process generates solid byproducts that need to be specifically treated or reused to avoid negative impacts on the environment and public health. This Final Course Work (TCC) proposes alternatives for reusing solid byproducts from a WWTP to reduce supply costs and contribute to sustainability. The methodology involves a literature review on solid waste treatment and disposal processes, in addition to the characterization of the waste generated, such as sludge. The characterization covers both physical and chemical aspects of the byproducts and their suitability for reuse. The results indicated an average efficiency of 93.87% in removing Biochemical Oxygen Demand (BOD) and 86.25% in reducing Chemical Oxygen Demand (COD), demonstrating the effectiveness of sewage treatment in WWTP studies. Regarding the location, it was observed that the use of polymers improved the efficiency of dehydration, allowing a more solid consistency and facilitating handling and transportation. The prediction of the agricultural use of the soil as fertilizer was also highlighted, as long as it is treated to reduce pathogens and minimize environmental risks.

Keywords: Solid waste; Reuse; Sewage treatment plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do tratamento de esgoto.	14
Figura 2: Delineamento metodológico.	27
Figura 3: Fluxograma do processo de tratamento de esgoto.	29
Figura 4: Fluxograma do processo de tratamento de lodo.	30
Figura 5: DBO efluente x DBO afluente	35
Figura 6: DQO efluente x DQO afluente.	36
Figura 7: Nitrogênio amoniacal efluente x Nitrogênio amoniacal afluente.	37
Figura 8: Fósforo total do efluente x Fósforo total do afluente.	38
Figura 9: Sólidos Suspensos Totais do efluente bruto	39
Figura 10: Vazão tratada na ETE	40
Figura 11: Vazão de lodo adensado.	40
Figura 12: Vazão de lodo adensado.	42
Figura 13: Lodo desidratado.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de lodo.	21
Tabela 2: Disposições finais do lodo.	23
Tabela 3: Requisitos legais para a destinação de resíduos sólidos.	25
Tabela 4: Geração de lodo.	32
Tabela 5: Consumo de polímero.	33
Tabela 6: Estudos do uso do lodo como fertilizante agrícola.	46
Tabela 7: Limite dos contaminantes dos biossólidos.	51
Tabela 8: Demanda Bioquímica de oxigênio.	56
Tabela 9: Demanda química de oxigênio.	57
Tabela 10: Nitrogênio Amoniacal.	58
Tabela 11: Fósforo Total.	59
Tabela 12: Sólidos Suspensos Totais.	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS.....	12
3.2.	TRATAMENTO DE ESGOTO	14
3.3.	PARÂMETROS DE QUALIDADE E CONTROLE NO TRATAMENTO DE ESGOTO.....	18
3.4.	CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS GERADOS	19
3.5.	TRATAMENTO DOS SUBPRODUTOS SÓLIDOS	19
3.6	CONDICIONAMENTO DO LODO.....	22
3.7	DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO	23
3.8	REQUISITOS LEGAIS	25
4	MÉTODOS.....	26
4.1	ESTUDOS DE CASO.....	27
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO.....	28
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS SÓLIDOS.....	30
4.4	DADOS SECUNDÁRIOS	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1	PARÂMETROS DO TRATAMENTO DE ESGOTO.....	34
5.2	GERAÇÃO DE LODO	39
5.3	VIABILIDADE DE MÉTODOS ALTERNATIVOS.....	44
5.4	PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO	49
6	CONCLUSÕES.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53
	ANEXO A – TABELAS DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	56

1 INTRODUÇÃO

O marco legal do Saneamento Básico, atendido pela Lei Federal nº 14.026/2020, prevê o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033, com possibilidade de ampliação para 2040. Por conta disso, as administrações superiores têm impulsionado cada vez mais os projetos de esgotamento sanitário no Brasil. Segundo os dados de 2022 do Sistema Nacional de Saneamento Básico (SNIS), 52,2% do esgoto gerado no Brasil recebe o tratamento adequado, sendo atendida uma média de 112,8 milhões de habitantes com este serviço. É válido mencionar que o estudo realizado pelo SNIS contou com uma amostra de 5.150 municípios, equivalente a 92,5% do total, e com 97,5% da população.

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil, realizado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg de resíduos por dia em 2022, totalizando 81,8 milhões de toneladas. Sendo desses, 61% deles encaminhados para aterros sanitários. Por essa razão, é crucial que os aterros sanitários busquem soluções para lidar com as demandas da produção de resíduos, e a adoção de práticas de reciclagem e reutilização tem sido cada vez mais reconhecida como uma alternativa eficaz para prolongar a vida útil dos aterros sanitários.

Além disso, é necessário que os empreendimentos busquem atender a um dos propósitos estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que consiste em promover a adoção de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para aprimorar os processos produtivos e promover a reutilização dos resíduos sólidos, incluindo sua recuperação.

O tratamento de esgotos gera subprodutos sólidos que deverão receber um tratamento e disposição final adequada. Com o aumento da cobertura do esgotamento sanitário, estes resíduos são gerados em quantidades elevadas, exigindo das Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) um alto custo e atenção especial devido à complexidade para a sua destinação adequada. Portanto, a reciclagem destes resíduos pode ser uma ótima alternativa para o desenvolvimento sustentável de uma cidade e redução de custos na administração das ETEs.

Entre os resíduos sólidos provenientes dos processos de tratamento de esgoto, há dois em destaque para reutilização: a areia capturada pelo desarenador e o lodo

produzido por processos físico-químicos e microbiológicos. A areia, removida durante a etapa de pré-tratamento, é proveniente das caixas de areia, que funcionam como decantadores, permitindo que a areia se deposite devido à baixa velocidade do fluxo (Von Sperling, 2005). Já os "lodos de esgoto", conforme descritos por Marcos Von Sperling consistem nos resíduos sólidos coletados e acumulados durante o processo de tratamento. Esses lodos são compostos por diversos materiais, incluindo matéria fecal, produtos químicos, microrganismos, sólidos suspensos e outros contaminantes presentes nas águas residuais.

A produção de areia e lodo nas estações de tratamento de esgoto apresenta desafios significativos tanto para a gestão ambiental quanto operacional dessas instalações. A acumulação de areia e detritos é um problema comum, pois pode levar à formação de gases com odor desagradável e possíveis obstruções ou acúmulos nas unidades de tratamento. Por outro lado, o lodo, que é um subproduto do processo de tratamento, também requer atenção especial. Se não for gerenciado de maneira adequada, pode representar riscos de poluição ambiental e para a saúde pública. O lodo contém microrganismos patogênicos que podem contaminar ao ambiente se não forem dispostos e higienizados corretamente. (Mendonça et al., 2019)

Portanto, é fundamental que as estações de tratamento de esgoto adotem práticas adequadas de gerenciamento de subprodutos sólidos para minimizar esses problemas e proteger o meio ambiente e a saúde pública. Isso pode incluir o uso de tecnologias de tratamento avançadas, práticas de disposição seguras e sustentáveis, e programas de monitoramento ambiental e de saúde ocupacional.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo é desenvolver e avaliar uma proposta viável e eficaz para a recuperação dos subprodutos sólidos gerados em uma ETE.

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o potencial de aproveitamento de subprodutos sólidos provenientes de uma estação de tratamento de esgoto sanitário, com o objetivo de estudar o uso agrícola do lodo, contribuindo para a gestão ambiental e econômica desses resíduos de forma sustentável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização dos subprodutos sólidos da ETE;
- Avaliação do potencial do lodo no uso agrícola;
- Desenvolvimento de estratégias de gestão.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica buscará explorar os principais conceitos relacionados ao tratamento de efluentes e à recuperação de subprodutos sólidos. Inicialmente, será apresentada uma revisão da literatura sobre os processos de tratamento de efluentes, abordando métodos convencionais e avançados utilizados em ETEs. Posteriormente, será discutido o conceito de subprodutos sólidos e sua relevância ambiental, além de revisar os métodos de recuperação desses materiais. Esta seção será fundamental para embasar teoricamente a pesquisa e contextualizar a proposta de recuperação dos subprodutos sólidos da ETE, destacando sua importância no contexto da gestão ambiental e da sustentabilidade.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ESGOTOS DOMÉSTICOS

Os sistemas de esgoto são tipicamente divididos em duas categorias principais: esgotos sanitários e industriais. Os esgotos sanitários são compostos principalmente por resíduos domésticos, com uma pequena proporção de água da chuva, infiltração e, ocasionalmente, alguns resíduos industriais. Originam-se principalmente de residências, edifícios comerciais e qualquer estrutura equipada com banheiros, lavanderias, cozinhas ou outras instalações para uso doméstico. São constituídos principalmente em urina, fezes, papel higiênico, restos de comida, produtos de limpeza e água de lavagem. Por outro lado, a composição dos esgotos industriais diversos é diversa e derivam de qualquer processo industrial que utilize água, adquirindo características específicas de acordo com o processo industrial envolvido. Portanto, cada indústria deve ser considerada individualmente, uma vez que os efluentes industriais podem variar mesmo entre processos industriais similares (Jordão; Pessôa, 2017).

Os esgotos são compostos principalmente por água, representando cerca de 99,9% do seu volume, enquanto os sólidos orgânicos e inorgânicos, além de microrganismos, constituem apenas cerca de 0,1%. São esses sólidos que demandam o tratamento do esgoto. Suas características físicas, químicas e biológicas

variam conforme a fonte de origem, o tamanho da população servida, os padrões de consumo, entre outros fatores (Von Sperling, 2005).

Fisicamente, os esgotos apresentam cor, turbidez, odor e temperatura. A coloração pode indicar se o esgoto é fresco ou está em estado de decomposição. A turbidez está relacionada à quantidade de partículas em suspensão na água. O odor pode ser resultado da presença de gases como o gás sulfídrico e outros produtos da decomposição. A temperatura geralmente reflete a temperatura ambiente, mas pode variar devido à atividade microbiana, solubilidade dos gases e viscosidade do líquido (Von Sperling, 2005).

Quimicamente, os esgotos contêm uma variedade de compostos, incluindo nutrientes como nitrogênio e fósforo, matéria orgânica, sólidos totais, pH, alcalinidade, cloretos, óleos e gorduras (Von Sperling, 2005).

Além disso, as características microbiológicas do esgoto sanitário são definidas pela presença de uma ampla diversidade de microrganismos, incluindo bactérias, vírus, protozoários e helmintos, que podem ser potencialmente patogênicos e apresentar riscos significativos à saúde humana. Entre esses microrganismos, alguns se destacam pela capacidade de transmitir doenças e são denominados organismos indicadores de contaminação fecal. Eles servem para avaliar a possível presença de patógenos no esgoto, já que indicam a contaminação por fezes humanas ou de animais.

De acordo com a Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental (ReCESA), os principais organismos indicadores são os coliformes termotolerantes, como *Escherichia coli*, que é predominante nesse grupo. Essa bactéria, abundante nas fezes humanas e de animais, é considerada o indicador mais confiável de contaminação fecal, embora não permita diferenciar se a origem da contaminação é humana ou animal. Outros gêneros bacterianos, como *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Citrobacter*, também podem estar presentes, embora em menor concentração. O teste de coliformes é realizado em alta temperatura para suprimir a presença de bactérias não fecais, mas ainda é possível que algumas bactérias de vida livre resistam ao processo. Por isso, o termo “coliformes termotolerantes” é preferido ao invés de “coliformes fecais”, para indicar melhor a resistência dessas bactérias às altas temperaturas, sem necessariamente caracterizá-las como fecais (Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental, 2008).

3.2. TRATAMENTO DE ESGOTO

O tratamento de esgoto é um processo que visa remover contaminantes e poluentes dos efluentes domésticos, comerciais e industriais, tornando-os seguros para o descarte no meio ambiente ou para reutilização. Esse processo envolve uma série de etapas físicas, químicas e biológicas que visam reduzir a carga de poluentes, incluindo matéria orgânica, nutrientes, microrganismos patogênicos e produtos químicos.

As principais etapas do tratamento de esgoto estão especificadas na Figura 1.

Figura 1: Etapas do tratamento de esgoto.



Fonte: Autor (2024).

3.2.1. TRATAMENTO PRELIMINAR

O processo de tratamento primário consiste na eliminação de resíduos sólidos maiores, utilizando geralmente grades, seguido pela separação desses materiais por sedimentação (por meio de uma caixa de areia e decantadores) ou flotação, especialmente para partículas suspensas. Esta etapa resulta na geração de uma quantidade de sólidos que necessita de um descarte apropriado. (Andrade Neto; Campos, 1999)

De acordo com Borges (2014), o tratamento preliminar desempenha um papel crucial como a primeira linha de defesa nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Sua importância reside na proteção dos equipamentos de transporte e tratamento do esgoto, como bombas, tubulações, raspadores, removedores e aeradores. Ao evitar o acúmulo de gordura, prevenir problemas de corrosão e incrustação, e reduzir odores desagradáveis, o tratamento preliminar assegura o funcionamento adequado desses dispositivos. Além disso, ao remover parcialmente a carga poluidora, contribui significativamente para otimizar o desempenho das etapas subsequentes do processo de tratamento.

- Remoção de sólidos grosseiros: Os resíduos denominados como sólidos grosseiros são componentes do esgoto sanitário que possuem uma estrutura fácil de reter e remover, geralmente por meio de dispositivos como peneiras ou grades. O processo de gradeamento é uma das técnicas mais antigas empregadas para a remoção de resíduos sólidos de grandes dimensões, como fragmentos de tecido, papel, plástico, metal, madeira, detritos vegetais, animais mortos, ossos e outros materiais semelhantes. Esses elementos podem causar danos ou obstruções nos equipamentos e bombas das estações de tratamento, interferindo em seu funcionamento adequado. (Borges, 2014)
- Retirada da areia: A presença de areia nos esgotos consiste principalmente em areia, pedregulho, silte, escória e cascalho, com adições de materiais domésticos como fios de cabelo, plásticos, fibras e penas de aves. A remoção da areia, através do processo de desarenação, tem como principal objetivo evitar possíveis problemas no funcionamento das etapas subsequentes do tratamento de esgoto. Além disso, essa remoção previne impactos negativos nos corpos d'água receptores, como o assoreamento. Como explicado por (Jordão; Pessôa, 2017), as caixas de areia ou desarenadores têm a função de reter a areia indesejada no efluente ou no corpo receptor, armazenar o material retido durante os períodos de limpeza e remoção, e acondicionar o material retido para o transporte até sua destinação final.
- Remoção de gordura e materiais flutuantes: Os esgotos carregam uma considerável quantidade de materiais com densidade inferior à da água, tais como óleos e graxas. A eliminação desses resíduos é crucial para prevenir problemas nas instalações das estações de tratamento, como obstrução de tubulações, aderência em componentes especiais da rede de esgoto, acúmulo nas unidades causando odores desagradáveis e impactos negativos nos corpos d'água receptores. Esse processo de remoção é conduzido por caixas de gordura, que podem ser individuais ou compartilhadas, além de outras tecnologias utilizadas nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), como dispositivos de separação de gorduras em decantadores, tanques aerados com ar comprimido, tanques de flotação e separadores de óleo. (Jordão; Pessôa, 2017)

3.2.2. TRATAMENTO PRIMÁRIO

No tratamento primário de esgoto, o principal objetivo é remover sólidos suspensos sedimentáveis, isto é, partículas orgânicas e inorgânicas que se depositam por gravidade. Esse processo ocorre em unidades denominadas decantadores primários, que são tanques cilíndricos ou retangulares onde o esgoto permanece por um período de tempo, permitindo a separação dos sólidos mais densos que o líquido (Gehling, 2017).

3.2.3. TRATAMENTO SECUNDÁRIO

O tratamento secundário tem como objetivo principal a decomposição biológica de compostos carbonáceos presentes no esgoto. Durante esse processo, ocorre naturalmente a decomposição de carboidratos, óleos, gorduras e proteínas em compostos mais simples, como dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), amônia (NH_3), entre outros. Ao mesmo tempo, as bactérias envolvidas no processo de degradação se reproduzem, resultando em um aumento na massa bacteriana total em proporção à quantidade de matéria orgânica degradada (Andrade Neto; Campos, 1999).

- Filtração biológica:

Neste processo, o esgoto é continuamente alimentado e percolado através de um meio de suporte. Isso promove o crescimento e a aderência de uma massa biológica na superfície do meio, convertendo substâncias coloidais em sólidos estáveis mais facilmente sedimentáveis. Para esse processo, (Jordão; Pessôa, 2017) destaca que é crucial uma ventilação adequada para garantir a presença de oxigênio. Geralmente, são utilizados materiais inertes e rígidos, como plástico ou britas, como meio de suporte.

- Lodos ativados:

O lodo ativado é formado por flocos que se desenvolvem no esgoto bruto ou já decantado, devido ao crescimento de organismos no efluente, na presença de oxigênio dissolvido. Esses flocos se acumulam em concentrações suficientes devido ao retorno de outros flocos já formados anteriormente. Assim, o esgoto afluente e o lodo ativado são combinados, agitados e aerados em tanques, permitindo que sejam posteriormente separados por sedimentação em decantadores. A injeção de ar no líquido é fundamental para

garantir a presença de oxigênio e o sucesso desse processo. (Jordão; Pessoa, 2017)

3.2.4. TRATAMENTO TERCIÁRIO

O tratamento terciário em esgotos sanitários visa principalmente reduzir as concentrações de nitrogênio e fósforo, geralmente por meio de processos biológicos realizados em etapas subsequentes conhecidas como nitrificação e desnitrificação. Além disso, a remoção do fósforo pode ser realizada também por tratamento químico, como o uso de sulfato de alumínio, por exemplo. Durante a nitrificação, o nitrogênio é transformado em nitrato, e posteriormente, na desnitrificação, é convertido em N_2 , principalmente liberado para a atmosfera (Andrade Neto; Campos, 1999).

3.2.5. DESINFECÇÃO

De acordo com Gonçalves (2003), na engenharia sanitária, a desinfecção é entendida como a fase do processo responsável por diminuir as populações de microrganismos relevantes para os limites estabelecidos pelas regulamentações correspondentes aos diversos usos da água. Para cada uso, são aplicados critérios e padrões de qualidade, nos quais não apenas as ocorrências e as concentrações máximas de organismos são levadas em conta, mas também os próprios organismos, seus grupos e tipos.

O Brasil conta com leis federais que definem critérios para águas tratadas destinadas ao consumo humano, águas brutas usadas na captação e tratamento para consumo, bem como normas para proteção da fauna e da flora, para irrigação e padrões microbiológicos para águas utilizadas em atividades de lazer, como banhos. (Jordão; Pessoa, 2017)

A Resolução CONAMA 357/2005 estabelece os padrões de qualidade da água para diversos usos, incluindo abastecimento humano, proteção das comunidades aquáticas, irrigação, recreação e navegação. Emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), essa resolução é uma importante referência para a gestão e proteção dos recursos hídricos no Brasil, pois aborda pontos importantes em relação aos padrões ambientais de qualidade da água: Classes de enquadramento, padrões de qualidade, critérios

de lançamento de efluentes, monitoramento e controle e proteção das comunidades aquáticas.

3.3. PARÂMETROS DE QUALIDADE E CONTROLE NO TRATAMENTO DE ESGOTO

A qualidade da água tratada em estações de esgoto é fundamental para a proteção ambiental e a saúde pública. Entre os diversos parâmetros utilizados para avaliar essa qualidade, a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e os compostos de nitrogênio se destacam por sua relevância na monitorização da eficiência dos processos de tratamento.

- DBO

No tratamento de esgotos, a DBO é um parâmetro crucial para monitorar a eficiência das estações, tanto nos processos biológicos aeróbios e anaeróbios quanto nos físico-químicos. Embora a demanda de oxigênio ocorra apenas nos processos aeróbios, é possível medir a demanda "potencial" na entrada e na saída de qualquer tipo de tratamento (CETESB, 2018).

As exigências para a remoção de matéria orgânica (DBO) variam conforme o uso pretendido e são justificadas por questões estéticas, como a aparência e o odor desagradável, além da necessidade de nutrientes para o crescimento microbiano e a eficácia da desinfecção (Bastos, 2008).

- DQO

Conforme descrito no estudo sobre qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo, DQO é a quantidade de oxigênio requerida para oxidar a matéria orgânica de uma amostra utilizando um agente químico. Sendo assim, a DQO é uma ferramenta valiosa quando analisada em conjunto com a DBO, pois permite avaliar a biodegradabilidade dos efluentes. Enquanto a DBO quantifica apenas a fração biodegradável, um valor de DBO que se aproxima da DQO indica que o efluente possui um maior potencial de biodegradabilidade (CETESB, 2018).

- Nitrogênio amoniacal

A amônia é um composto tóxico que pode prejudicar a vida aquática, já que muitas espécies de peixes não toleram concentrações superiores a 5 mg/L. Além disso, a oxidação biológica da amônia consome oxigênio dissolvido nas águas, sendo necessária a sua retirada no processo de tratamento (CETESB, 2008).

- Fósforo Total

O fósforo é um dos principais nutrientes para os processos biológicos, classificado como um macro-nutriente essencial (CETESB, 2008).

- Sólidos suspensos totais (SST)

Os sólidos totais e sólidos voláteis são parâmetros que podem ser empregados para avaliar o nível de estabilização da matéria orgânica no lodo, o que, por sua vez, está ligado ao seu potencial de putrefação. Esse processo de putrefação está diretamente associado à capacidade do lodo de gerar odores desagradáveis e de atrair vetores de doenças, como roedores, aves e insetos (CORREIA, 2009).

3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS GERADOS

A caracterização dos subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto fornece informações essenciais para o desenvolvimento de estratégias de gestão adequadas, incluindo a seleção de tecnologias de tratamento, a definição de critérios de reciclagem ou reutilização, a garantia da conformidade com regulamentações ambientais e sanitárias, e a minimização de impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública. Segundo (Mendonça et al., 2019), a finalidade desse processo de caracterização é obter dados tanto qualitativos quanto quantitativos sobre os aspectos mais relevantes, como:

- i) Origem do material (sólidos grosseiros/peneiramento, areia, gordura, espuma, lodo);
- ii) Processo de tratamento empregado na ETE;
- iii) Produção do subproduto sólido na ETE;
- iv) Característica físico-química e microbiológica.

3.5. TRATAMENTO DOS SUBPRODUTOS SÓLIDOS

O tratamento de esgoto gera diversos tipos de resíduos, como sólidos, semissólidos, líquidos e gasosos, que requerem tratamento antes de serem descartados ou reaproveitados. Dentre os resíduos passíveis de reutilização, estão a água tratada para reuso, os subprodutos sólidos e o biogás. Este estudo focaliza especificamente o segundo tipo de resíduo mencionado: os sólidos.

De acordo com a NBR 10.004/04, os resíduos sólidos são aqueles que estão em estado semissólido ou sólido, resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, etc.

Desvinculado do planejamento dos sistemas de tratamento de esgoto, de acordo com (Mendonça et al., 2019), todos estão preocupados com a gestão do subproduto sólido resultante desse processo, pois a ausência de tratamento e destinação adequada pode demandar intervenções complexas e custosas dentro e fora da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

A areia retirada durante o tratamento preliminar, é essencial para prevenir danos mecânicos e acúmulos indesejados nas estruturas da Estação de Tratamento de Esgoto. Além da areia, outros materiais sólidos, como pontas de cigarro e pedaços de metal, também são removidos, já que possuem uma densidade maior que os sólidos orgânicos biodegradáveis presentes no esgoto (Wef, 1994).

A norma NBR 12209/2011 fornece diretrizes abrangentes sobre os elementos e unidades destinados ao tratamento preliminar, os quais podem ser empregados na eliminação da areia, tais como peneiras, grades e desarenadores. Esses dispositivos são frequentemente utilizados para separar os sólidos mais grosseiros presentes no esgoto bruto, como a areia, que pode ser decantada e retirada antes que o esgoto avance para as fases subsequentes do tratamento.

A remoção da areia nos desarenadores ou caixas de areia, podem ser classificadas quanto à limpeza manual (desarenador tipo canal de câmara dupla) e limpeza mecanizada (aerada, desarenador com raspador de acionamento central, parafuso, etc.). Algumas vezes, não é possível fazer a caracterização de toda a areia do esgoto, pois em alguns casos, os desarenadores têm o seu desempenho limitado pelo transporte de partículas com distribuição granulométrica inferior ao valor de referência estabelecido por norma. Além disso, em pequenas estações de tratamento,

as dimensões das caixas de areia prismáticas retangulares são bastante reduzidas, comprometendo a etapa de limpeza manual. (Mendonça et al., 2019)

A falta de um gerenciamento adequado da areia produzida no processo de tratamento de esgoto pode acarretar diversos problemas, como a geração de odores desagradáveis e possíveis obstruções ou acúmulos nas unidades da estação de tratamento. As etapas comumente adotadas para o tratamento da areia devem seguir alguns princípios básicos: i) remoção regular para evitar odores e atração de vetores de doenças; ii) transporte adequado para sua destinação final; iii) disposição do material em aterros sanitários apropriados. (Mendonça et al., 2019)

A maioria das soluções para o gerenciamento da areia envolve sua separação e transporte para aterros sanitários. No entanto, está se tornando cada vez mais comum o reaproveitamento desse material na construção civil ou sua disposição nas áreas próximas à estação de tratamento de esgoto. Segundo (Borges et al., 2016), a possibilidade de reutilizar a areia retirada dos desarenadores das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) na construção civil é considerada uma alternativa viável. Essa abordagem parte do pressuposto de que a areia passará por um processo de limpeza rigoroso, visando eliminar ou reduzir consideravelmente a presença de micro-organismos nocivos e resíduos orgânicos. No entanto, apesar das potenciais vantagens econômicas e ambientais que essa prática pode oferecer, ainda é uma área pouco explorada e que carece de estudos mais aprofundados.

De acordo com a NBR 12.209/2011, o lodo é uma mistura de substâncias minerais e orgânicas dispersas em água, as quais são separadas durante o tratamento de resíduos líquidos. A classificação do lodo se dará pelo tipo de tratamento empregado na ETE, podendo ser classificado segundo a tabela abaixo:

Tabela 1: Tipos de lodo.

Tipo de lodo	Descrição
Lodo biológico	Produzido em tratamento biológico
Lodo primário	Resultante dos sólidos em suspensão
Lodo misto	Mistura do lodo primário e biológico
Lodo seco	Resultante da etapa de desidratação

Fonte: Autor (2024).

Antes de ser manuseado e destinado para disposição final, o lodo passa por um processo chamado adensamento, que visa aumentar a densidade de sólidos no lodo, o que resulta na redução do volume ocupado. Isso possibilita uma diminuição na capacidade volumétrica necessária para as unidades subsequentes de tratamento, como os digestores, além de possibilitar o uso de bombas de menor tamanho. (Pedroza et al. ,2010)

3.6 CONDICIONAMENTO DO LODO

A utilização de polímeros tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionada pela busca por soluções mais econômicas e sustentáveis. Isto se deve pela crescente preocupação com questões ambientais e pela busca de soluções econômicas no processo de tratamento de subprodutos sólidos.

3.6.1 POLÍMEROS

Polímeros ou polieletrólitos são formados pela polimerização de monômeros simples, resultando em substâncias de alto peso molecular (Metcalf and Eddy, 1991).

Os polímeros são classificados conforme sua carga elétrica, podendo ser aniônicos (carga negativa), catiônicos (carga positiva) ou não iônicos. A eficácia desses polímeros está diretamente relacionada ao seu grau de interação com o efluente, e sua performance pode variar devido a mudanças nas características do efluente, como carga, turbidez e presença de sólidos suspensos (Água e efluentes, 2023).

De acordo com (Nozela, 2014), como os sólidos no lodo possuem cargas negativas, os polímeros mais utilizados são os catiônicos, que têm carga oposta. A principal função dos polímeros é aumentar o tamanho das partículas do lodo, o que reduz a área superficial específica por peso unitário. Como a resistência à desidratação está ligada às perdas por atrito superficial, o aumento das partículas diminui essa área, melhorando as taxas de desidratação (Haak, 2011).

3.7 DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO

De acordo com (Ferreira; Andreoli, 1999), dentre as possíveis alternativas para a disposição final do lodo, podem ser consideradas:

- Aterros sanitários
- Incineração
- Reciclagem agrícola
- Landfarming

Estudos mostram que usar aterros sanitários para o descarte dos resíduos sólidos provenientes do tratamento de esgoto não é considerado uma solução sustentável. Isso ressalta ainda mais a necessidade de encontrar métodos que sejam mais ecológicos, sustentáveis e financeiramente viáveis para a disposição final do lodo. Além disso, ao adotar essas alternativas, o lodo deixa de ser um resíduo descartável e passa a ser reincorporado ao processo produtivo. (Godoy, 2013).

Para isto, após a fase líquida, o lodo precisa ser processado nas estações de tratamento. Durante a fase sólida, é necessário tratar ou dispor do lodo de acordo com o método de descarte final ou para reutilização. (Sperling, 2013).

A tabela a seguir apresenta uma análise comparativa dos principais métodos de disposição final do lodo, destacando suas vantagens, desvantagens e referências para um melhor entendimento das implicações de cada abordagem.

Tabela 2: Disposições finais do lodo.

Disposição final	Vantagens	Desvantagens	Referência
Aterros sanitários	-Simplicidade no processo -Custo relativamente baixo -Facilita o gerenciamento de grandes quantidades de lodo	-Custos elevados para a operação e manutenção; -Uso extensivo de espaço	(HENDGES et al., 2014)

Disposição final	Vantagens	Desvantagens	Referência
Compostagem	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de um composto com excelentes características agronômicas; - Eficácia na eliminação de patógenos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de controle rigoroso das condições para evitar patógenos -Tempo de processamento longo 	(PAREDES FILHO, 2011).
Uso em agricultura	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da produtividade; - Melhoria na qualidade das colheitas; - Redução de custos; - Melhoria nas qualidades físicas, químicas e biológicas do solo; - Garantia da longevidade da atividade agrícola. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de produção de insumo com qualidade assegurada; - Definição de restrições de uso para determinados tipos de solo; - Desenvolvimento de alternativas tecnológicas para aumentar a rentabilidade do produtor. 	(COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR, 1999)

Disposição final	Vantagens	Desvantagens	Referências
Desidratação e reutilização	<ul style="list-style-type: none">-Redução dos custos de transporte ao local de disposição final.- Facilidade no manejo, pois o lodo desaguado é mais fácil de transportar.- Aumento do poder calorífico do lodo, diminuindo a umidade e facilitando a incineração.- Redução do volume para disposição em aterro ou reuso na agricultura.	<ul style="list-style-type: none">-Necessidade de um sistema de desidratação eficiente-Pode não eliminar todos os patógenos	(GONÇALVES et al., 2001)

Fonte: Autor (2024).

3.8 REQUISITOS LEGAIS

Os aspectos legais relacionados à reciclagem e reutilização dos subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgoto podem variar de acordo com a legislação ambiental de cada país ou região específica. No entanto, em muitos casos, esses aspectos legais podem incluir regulamentações ambientais, licenciamentos, normas técnicas, etc.

Tabela 3: Requisitos legais para a destinação de resíduos sólidos.

Título	Descrição	Referência
Agenda 21 - Capítulo 21	Aborda o manejo ambientalmente saudável de resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos. Foca na geração, tratamento, disposição final e prevenção da geração de resíduos sólidos, destacando a reutilização e reciclagem como áreas principais.	Souza et al., 2019; Nações Unidas

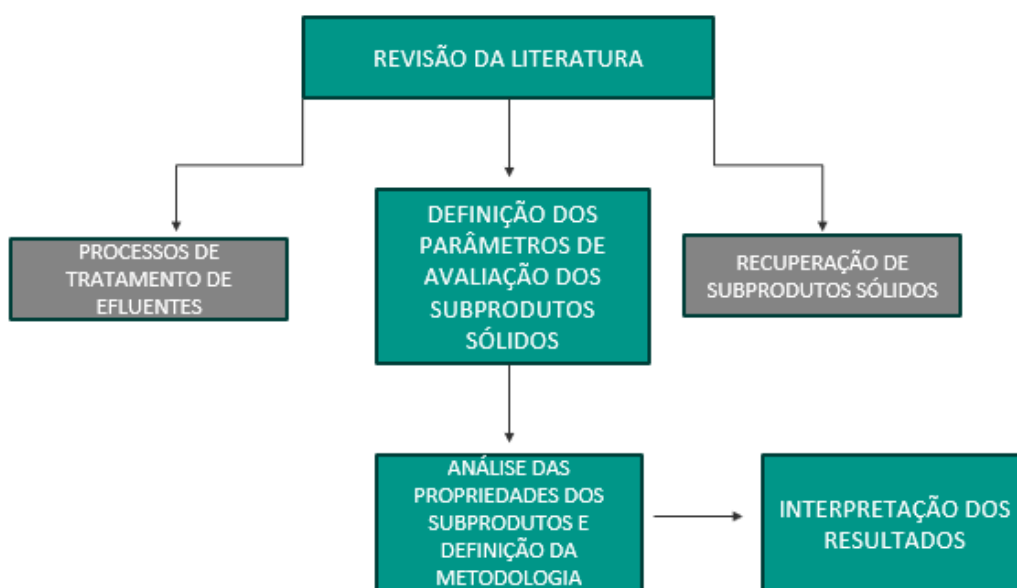
Título	Descrição	Referência
Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	Estabelece a elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) pelos responsáveis pela geração de resíduos sólidos em serviços públicos de saneamento básico. O PGRS deve garantir a segurança dos processos, prevenir danos ao meio ambiente e saúde pública, e deve priorizar a redução de geração de resíduos e minimização dos impactos ambientais.	Lei nº 12.305/2010
Resolução CONAMA 448/2012	Define diretrizes para a gestão de resíduos sólidos provenientes de serviços de saúde. Estabelece requisitos para o manejo, transporte e disposição final desses resíduos, além de exigir a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS).	CONAMA, 2012
Resolução CONAMA 498/2020	Estabelece critérios e procedimentos para a produção e uso de biossólidos em solos, além de fornecer outras disposições.	CONAMA, 2020
Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998)	Prevê penalidades para crimes ambientais relacionados ao manejo inadequado de resíduos sólidos, incluindo multas e sanções penais para ações que causam danos ao meio ambiente.	Lei nº 9.605/1998
Normas Técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)	Estabelece padrões técnicos e diretrizes para a gestão de resíduos sólidos, incluindo coleta, transporte, tratamento e disposição final. Essas normas buscam assegurar práticas seguras e eficientes no manejo de resíduos. <i>Fonte: Autor (2024).</i>	ABNT

4 MÉTODOS

Inicialmente, serão realizados estudos teóricos para a compreensão dos fundamentos e conceitos relevantes relacionados ao tratamento de esgoto doméstico e a geração dos subprodutos sólidos. Por meio da revisão bibliográfica e análise crítica de estudos anteriores, serão identificadas lacunas no conhecimento existente, tendências, debates e abordagens metodológicas utilizadas por outros pesquisadores. Ao analisar e sintetizar as informações obtidas, será desenvolvida

uma visão ampla e aprofundada do campo de estudo, o que contribui para a formulação de hipóteses de possibilidades viáveis para o aproveitamento dos subprodutos sólidos de uma ETE. Na Figura 2 está indicado o fluxograma das etapas da metodologia utilizada.

Figura 2: Delineamento metodológico.



Fonte: Autor (2024).

4.1 ESTUDOS DE CASO

Para embasar a análise sobre a destinação e reciclagem do lodo, foram realizados estudos literários selecionados que abordam diversas práticas e tecnologias associadas à gestão desses resíduos. Esses estudos fornecem uma visão abrangente sobre os métodos utilizados para o tratamento e a disposição final do lodo, bem como suas implicações ambientais, econômicas e sociais. A partir da revisão de literatura, foi possível elaborar uma fundamentação teórica sólida, que sustenta a compreensão das diferentes abordagens e suas respectivas vantagens e desvantagens.

Adicionalmente, foi empregada uma metanálise como ferramenta para integrar e avaliar os resultados de diversos estudos anteriores. A metanálise é uma técnica estatística que combina os dados de múltiplos estudos independentes para identificar

padrões comuns, avaliar a consistência dos resultados e extrair conclusões mais robustas. No contexto da gestão de lodo, essa abordagem permitiu uma análise mais detalhada e objetiva das práticas de destinação e reciclagem, contribuindo para uma avaliação crítica das evidências disponíveis e a identificação das melhores práticas. Com isso, a fundamentação teórica resultante oferece um panorama mais claro e fundamentado sobre as opções de disposição final do lodo, orientando decisões e estratégias para uma gestão mais eficiente e sustentável.

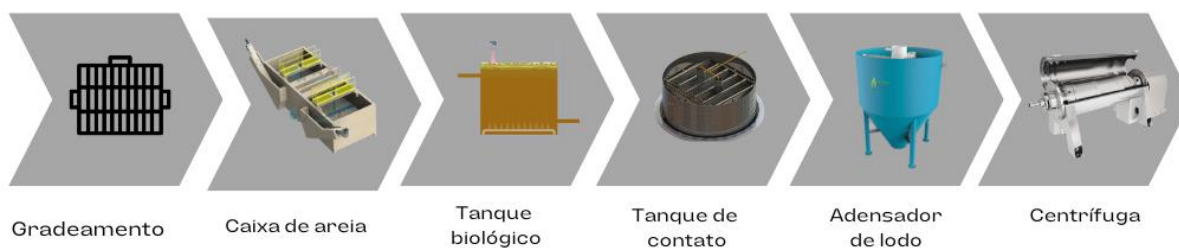
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO

Para a presente pesquisa, foi selecionada uma Companhia de Saneamento que se destaca pelo seu compromisso em atender a uma ampla população da capital. Esta empresa é responsável pela coleta e tratamento de esgoto para aproximadamente 350 mil moradores ao final de seu projeto, desempenhando um papel crucial na manutenção da saúde pública e na preservação ambiental. Além disso, atualmente, a estação trata em média cerca de 206 m³ de esgoto por mês. A escolha desta companhia se deu devido à sua relevância e abrangência na gestão dos serviços de saneamento, o que proporciona uma base sólida para analisar e avaliar as práticas e desafios relacionados à disposição e reciclagem do lodo gerado pelo tratamento de esgoto.

A seleção desta ETE oferece uma oportunidade valiosa para examinar um cenário real e complexo, refletindo a realidade de grandes sistemas de tratamento de esgoto. Ao focar em uma entidade que lida com um volume significativo de resíduos e atende uma vasta população, a pesquisa busca compreender melhor as estratégias de gestão adotadas, bem como identificar áreas de melhoria e inovações potenciais. Esta abordagem permite uma análise detalhada das práticas e impactos associados ao manejo do lodo, fornecendo *insights* relevantes para a otimização dos processos e para a formulação de políticas mais eficazes na área de saneamento.

O processo de tratamento de esgoto na estação selecionada é conduzido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3. Este fluxograma detalha as etapas essenciais que garantem a eficácia e eficiência no tratamento do esgoto, desde a entrada até a saída do sistema.

Figura 3: Fluxograma do processo de tratamento de esgoto.



Fonte: Autor (2024).

No tratamento de esgoto da companhia em questão, o processo é iniciado com o efluente sanitário bruto sendo submetido a um meticuloso tratamento de gradeamento, começando pelo gradeamento grosso e seguido pelo fino. Esta etapa essencial visa remover todas as partículas sólidas, prevenindo o desgaste e a falha dos equipamentos de aparelhos posteriores.

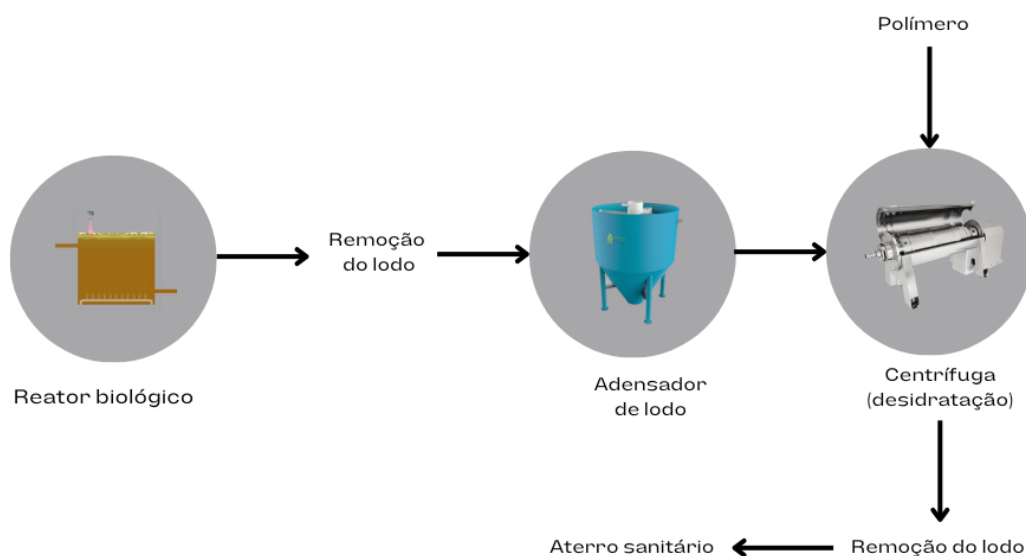
Subsequente ao gradeamento, o efluente é direcionado para a caixa de areia, um tanque de baixo fluxo projetado para a sedimentação de partículas mais pesadas, como areia e cascalhos. Estas partículas se depositam no fundo da caixa, onde são removidas com o auxílio de espátulas especializadas.

A degradação da matéria orgânica é então realizada por meio de reatores biológicos, utilizando a tecnologia de *Continuous Flow Intermittent Cleaning* (CFIC). Esta tecnologia inovadora baseia-se no crescimento de microrganismos sobre suportes de bloco de polietileno, proporcionando uma superfície protetora que favorece o desenvolvimento microbiano e a eficiência do processo de degradação.

Finalmente, para assegurar a eliminação completa de organismos patógenos, o efluente é submetido a um rigoroso processo de desinfecção utilizando hipoclorito de sódio, garantindo a segurança e a qualidade final do efluente tratado.

O lodo produzido durante o tratamento no reator biológico é conduzido ao adensador, onde ocorre a remoção do líquido excedente. Esta etapa é crucial para preparar o lodo para o próximo estágio do processo: a centrifuga. Neste equipamento especializado, o lodo é submetido a uma secagem eficiente, facilitada pela adição de polímero. O polímero atua como agente desidratante, promovendo a separação eficaz da umidade e resultando em lodo com uma consistência mais sólida e manejável. O processo ao qual o lodo está submetido está representado na Figura 4.

Figura 4: Fluxograma do processo de tratamento de lodo.



Fonte: Autor (2024).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBPRODUTOS SÓLIDOS

No processo de tratamento de esgoto da companhia de saneamento selecionada, os resíduos sólidos gerados são oriundos de três principais fontes: o gradeamento, a caixa de areia e o lodo. Dentre esses resíduos, a areia e o lodo são passíveis de aproveitamento e possíveis processos de reciclagem. No entanto, a reciclagem da areia na estação encontra um obstáculo significativo, uma vez que o laboratório da companhia não dispõe das análises necessárias para avaliar a viabilidade da reutilização deste material.

A falta dessas análises laboratoriais impede a realização de estudos adequados sobre a reciclagem da areia, limitando as possibilidades de reaproveitamento e gestão sustentável dos resíduos sólidos gerados. Em contraste, há análises e laudos do lodo, o qual pode ser devidamente tratado e reciclado, demonstrando a capacidade da estação para otimizar o aproveitamento dos resíduos, mesmo diante das limitações atuais relacionadas à areia.

4.4 DADOS SECUNDÁRIOS

Os dados secundários utilizados nesta análise foram obtidos da Estação de Tratamento de Esgoto escolhida, abrangendo resultados de ensaios laboratoriais realizados entre janeiro de 2023 e junho de 2024. Esses dados são especialmente relevantes para a compreensão da produção de lodo gerado durante o tratamento de

esgoto, um aspecto crucial para o tema do reaproveitamento de lodo. Ao analisar esses resultados, podemos avaliar a quantidade e a qualidade do lodo produzido, além de explorar oportunidades para sua valorização e reuso.

É importante ressaltar que, ao longo do período analisado, a Estação de Tratamento de Esgoto operou a 30% de sua capacidade total. Ao final do projeto, a ETE deverá funcionar com uma capacidade para tratar 360 litros de esgoto por segundo, contando com uma malha de rede de coleta abrangente, que inclui linhas de recalque, 11 estações elevatórias de esgoto e 30 mil ligações de domicílios à rede. Essa expansão na capacidade de tratamento não apenas possibilitará um aumento na eficiência do processo, mas também influenciará diretamente a quantidade de lodo gerado, tornando ainda mais relevante o estudo do seu reaproveitamento. Essa investigação não apenas contribui para práticas sustentáveis, mas também para a eficiência dos sistemas de saneamento, tornando o reaproveitamento de lodo uma alternativa viável e ambientalmente responsável.

- Geração de lodo

A ETE disponibilizou informações detalhadas sobre duas formas do lodo tratado: o lodo adensado e o lodo desidratado (Tabela 4). O lodo adensado, com um teor de umidade ainda elevado, é resultante das primeiras etapas de tratamento, onde parte da água é removida, mas o material ainda mantém uma consistência semi-líquida.

Por outro lado, o lodo desidratado passa por um processo mais rigoroso de remoção de água, o que resulta em um material de consistência mais sólida. Esse lodo é caracterizado por uma redução significativa no volume e no peso, facilitando tanto o armazenamento quanto o transporte.

Tabela 4: Geração de lodo

Período	Vazão de Lodo adensado (m³)	Teor de Sólidos Adensado (%)	Geração de Lodo Desidratado (TON)	Teor de Sólidos desidratado (%)
Janeiro 2023	931	2,35	78,97	21,76
Fevereiro 2023	970	2,45	96,19	22,30
Março 2023	990	3,24	134,51	20,85
Abril 2023	1.268	2,98	171,79	19,78
Mai 2023	539	3,92	63,84	21,72
Junho 2023	845	4,68	185,25	21,24
Julho 2023	805	4,32	191,80	22,01
Agosto 2023	1.009	3,60	154,21	21,33
Setembro 2023	867	4,57	177,50	20,84
Outubro 2023	970	3,25	153,57	20,03
Novembro 2023	1.331	3,28	185,58	20,38
Dezembro 2023	1.134	2,92	153,17	20,37
Janeiro 2024	1.537	2,95	187,05	20,8
Fevereiro 2024	1.392	3,48	214,52	20,05
Março 2024	1.230	4,55	169,85	20,55
Abril 2024	1.228	3,87	207,67	20,64
Mai 2024	954	4,59	195,60	20,91
Junho 2024	344	5,65	76,07	22,53

Fonte: Autor (2024).

- Consumo de polímero

O cálculo do consumo de polímero (kg/MTS) foi feito considerando a quantidade de polímero utilizado em relação ao teor de sólidos do lodo adensado. A fórmula empregada é a seguinte:

$$\text{Consumo de polímero} = \frac{\text{Quantidade de polímero}}{(Q \text{ lodo adensado} \times \text{Teor de sólidos adensado})} \times 100$$

Na qual,

- Quantidade de polímero: Medida em quilogramas (kg). Refere-se à quantidade de polímero utilizado no processo de tratamento do lodo.
- Vazão do lodo adensado: Medida em metros cúbicos (m³). Representa o volume de lodo adensado que está sendo processado.
- Teor de sólidos adensado: Medida em percentual (%). Refere-se à concentração de sólidos presente no lodo adensado, indicando a proporção de sólidos em relação ao volume total de lodo.
- Consumo de polímero: Medida em quilogramas por tonelada de sólidos totais (kg/MTS). Representa a quantidade de polímero consumido por tonelada de sólidos totais presentes no lodo adensado.

Esse método permite quantificar o consumo de polímero de forma precisa, considerando o teor de sólidos presente no lodo, o que é essencial para otimizar o uso de polímeros no processo de desidratação e para gerenciar os custos de tratamento de forma eficiente.

Tabela 5: Consumo de polímero

Período	Consumo de Polímero (kg/TMS)
Janeiro 2023	6,86
Fevereiro 2023	6,31
Março 2023	7,01
Abril 2023	5,95
Mai 2023	4,73
Junho 2023	5,06
Julho 2023	5,75
Agosto 2023	5,51
Setembro 2023	5,05
Outubro 2023	7,14
Novembro 2023	8,02
Dezembro 2023	9,06
Janeiro 2024	9,92
Fevereiro 2024	8,77

Período	Consumo de polímero (kg/TMS)
Março 2024	9,38
Abril 2024	6,31
Maio 2024	6,28
Junho 2024	6,43

Fonte: Autor (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PARÂMETROS DO TRATAMENTO DE ESGOTO

Os gráficos apresentados a seguir foram construídos com base nas características físico-químicas do efluente bruto e tratado, conforme indicado nas Tabelas 7, 8, 9, 10 e 11 do Anexo A.

- DBO

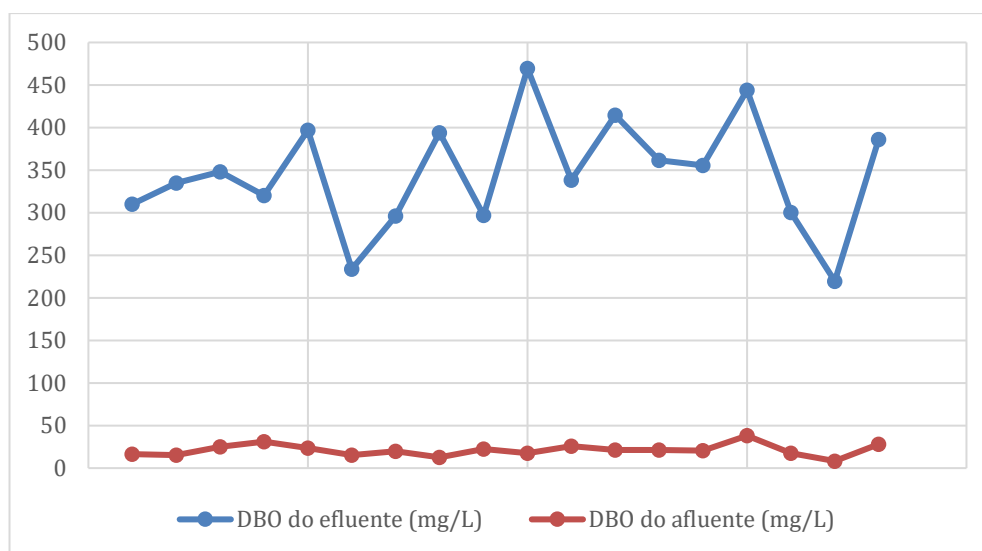
A estação de tratamento de esgoto apresentou uma média de eficiência na remoção de DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) de 93,87%. Esse índice indica que a maior parte da poluição orgânica é removida do esgoto durante o processo de tratamento.

Antes do tratamento, em outubro de 2023, o maior valor de DBO registrado foi de 469,5 mg/L, como exposto na Figura 5. Esse número reflete uma alta carga de matéria orgânica no esgoto bruto, indicando o nível de poluição que estava presente antes do processo de tratamento. Valores altos de DBO no esgoto influenciam diretamente a qualidade da água e o impacto ambiental, uma vez que indicam a quantidade de oxigênio que os microrganismos necessitam para decompor a matéria orgânica.

Além disso, o maior valor de DBO após o tratamento foi de 38,1 mg/L, registrado em março de 2024. Esse valor, embora relativamente baixo em comparação com os padrões de esgoto tratado, ainda representa uma quantidade de matéria orgânica na água. Valores de DBO após o tratamento são importantes, pois ajudam a determinar a qualidade da água que será liberada no meio ambiente.

Em resumo, a eficiência de 93,87% na remoção de DBO demonstra a eficácia do tratamento de esgoto, enquanto os valores registrados antes e após o tratamento fornecem informações sobre a carga de poluição e a qualidade da água tratada.

Figura 5: DBO efluente x DBO afluente



Fonte: Autor (2024).

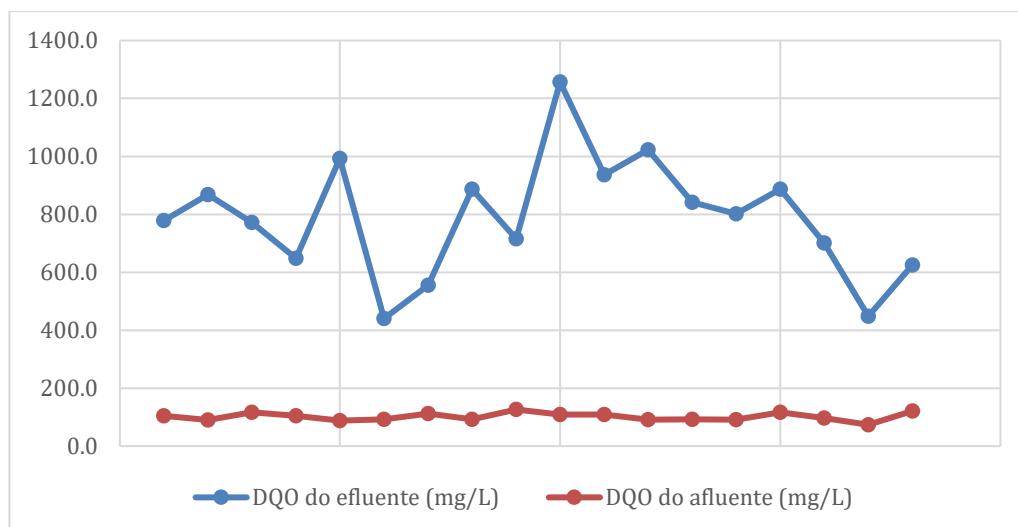
• DQO

A estação de tratamento de esgoto apresentou uma eficiência média de 86,25% na remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio). Esse índice reflete a capacidade do sistema de reduzir a quantidade de matéria orgânica e substâncias químicas presentes no esgoto.

Em outubro de 2023, o maior valor de DQO registrado antes do tratamento foi de 1256,5 mg/L, conforme mostra a Figura 6. Esse valor indica uma carga elevada de poluentes químicos e orgânicos no esgoto bruto, que pode impactar negativamente a qualidade da água se não for adequadamente tratado.

Após o tratamento, o maior valor de DQO foi de 121 mg/L, em junho de 2024. Este valor é consideravelmente mais baixo e demonstra a eficácia do processo de tratamento na redução da carga poluidora.

Figura 6: DQO efluente x DQO afluente.



Fonte: Autor (2024).

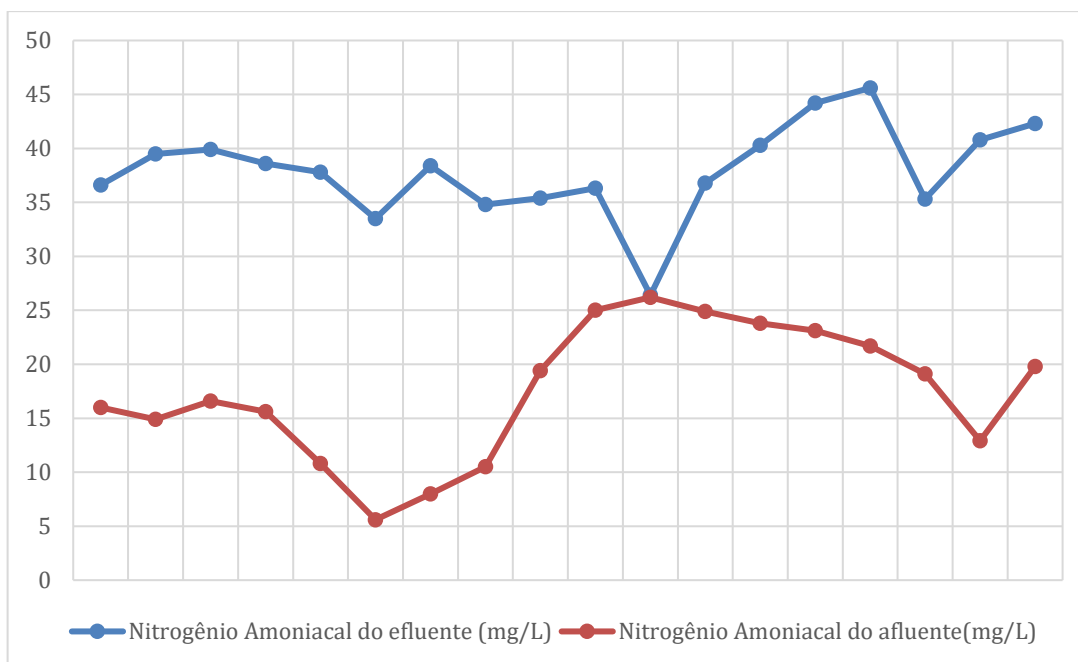
- Nitrogênio amoniacal

A estação de tratamento de esgoto apresentou uma eficiência de 53,24% na remoção de nitrogênio amoniacal. Esse índice é relevante, pois o nitrogênio amoniacal é um composto que, em altas concentrações, pode impactar negativamente a qualidade da água, contribuindo para a eutrofização de corpos hídricos e prejudicando a vida aquática.

A Figura 7 mostra os valores registrados de nitrogênio amoniacal no efluente bruto. Em março de 2024, o maior valor de nitrogênio amoniacal registrado antes do tratamento foi de 45,6 mg/L. Essa concentração elevada no esgoto bruto indica uma carga significativa de poluentes, que pode resultar em problemas ambientais se não for tratada adequadamente.

Após o tratamento, em novembro de 2023, o maior valor de nitrogênio amoniacal foi de 26,2 mg/L. Embora essa redução mostre uma melhora na qualidade da água, o valor ainda pode ser considerado elevado em relação aos padrões desejáveis para a água liberada no meio ambiente. A presença de nitrogênio amoniacal, mesmo após o tratamento, pode contribuir para a geração de lodo, uma vez que os microrganismos responsáveis pela decomposição desse composto proliferam, aumentando a quantidade de resíduos gerados.

Figura 7: Nitrogênio amoniacal efluente x Nitrogênio amoniacal afluente.



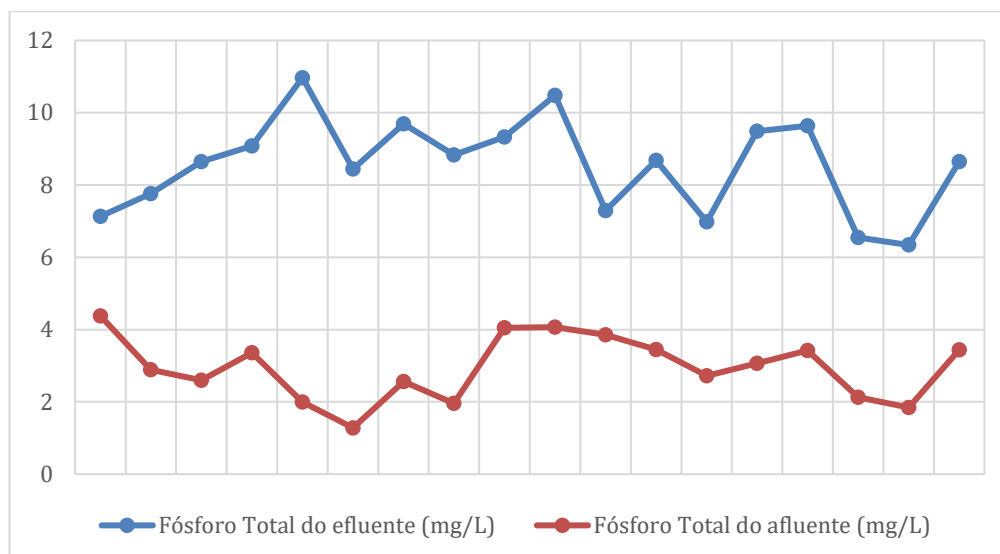
Fonte: Autor (2024).

- Fósforo total

A estação de tratamento de esgoto apresentou uma eficiência de 64,97% na remoção de fósforo total. Essa eficiência é importante, pois o fósforo em excesso pode levar à eutrofização de corpos hídricos, causando o crescimento descontrolado de algas e afetando negativamente a qualidade da água. Em maio de 2023, o maior valor de fósforo total registrado antes do tratamento foi de 10,97 mg/L, como demonstrado na Figura 8. Essa concentração elevada indica uma carga significativa de poluentes no esgoto bruto, o que pode impactar a qualidade da água se não for devidamente tratado.

Após o tratamento, em janeiro de 2023, o maior valor de fósforo total foi de 4,38 mg/L. Embora essa redução indique uma melhora na qualidade da água, o valor ainda pode ser considerado acima do ideal para a água que será liberada no meio ambiente. A presença de fósforo, mesmo após o tratamento, pode também influenciar a geração de lodo, uma vez que os microrganismos que decompõem esse composto se proliferam, contribuindo para o aumento da quantidade de resíduos gerados.

Figura 8: Fósforo total do efluente x Fósforo total do afluente.



Fonte: Autor (2024).

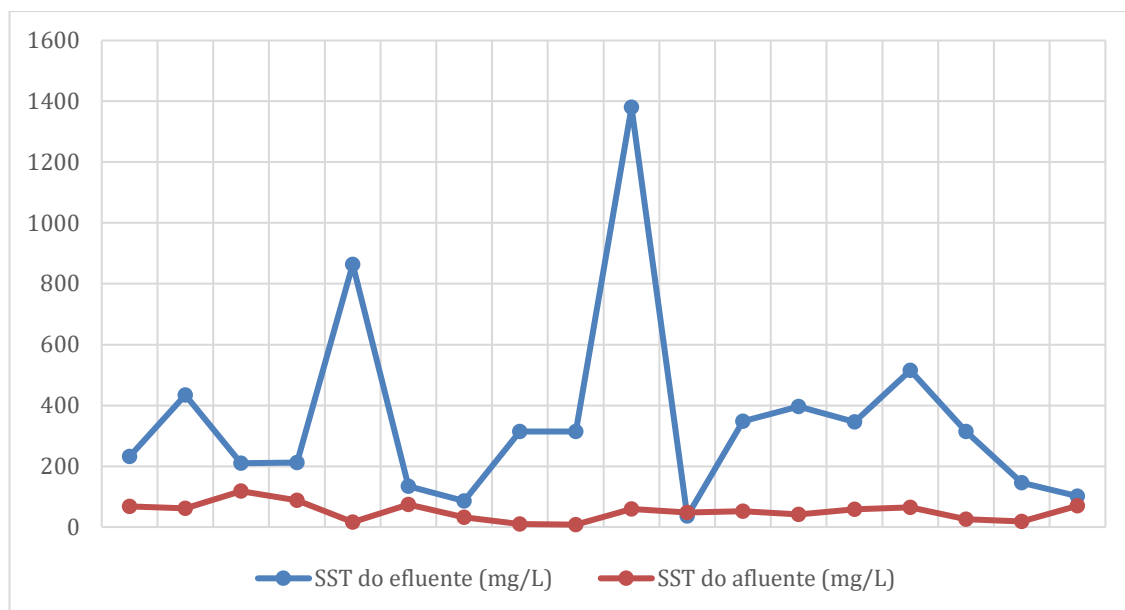
- Sólidos Suspensos Totais

A estação de tratamento de esgoto apresentou uma eficiência de 70,94% na remoção de sólidos suspensos totais. Essa eficiência é crucial, pois a presença de sólidos em suspensão pode afetar a qualidade da água, obstruir ecossistemas aquáticos e interferir na fotossíntese, além de dificultar o tratamento em etapas posteriores.

De acordo com a Figura 9, em outubro de 2023, foi registrado o maior valor de sólidos suspensos totais antes do tratamento, sendo 1380 mg/L. Esse valor elevado indica uma carga significativa de poluentes no esgoto bruto, que pode resultar em sérios impactos ambientais se não for adequadamente tratado.

Após o tratamento, em março de 2023, o maior valor de sólidos suspensos totais foi de 118 mg/L. Essa redução significativa mostra a eficácia do sistema em remover a maior parte dos sólidos, resultando em uma qualidade de água consideravelmente melhorada. No entanto, o valor ainda deve ser monitorado, pois a presença de sólidos, mesmo em quantidades menores, pode contribuir para a formação de lodo e exigir uma gestão adequada.

Figura 9: Sólidos Suspensos Totais do efluente bruto



Fonte: Autor (2024).

5.2 GERAÇÃO DE LODO

- Vazão tratada x lodo adensado

Fazendo uma relação entre a vazão de esgoto tratado (Figura 10) e a vazão de lodo adensado (Figura 11) ao longo de um período de 16 meses, de janeiro de 2023 a junho de 2024, são revelados padrões interessantes na interação entre esses dois parâmetros.

Observa-se que, em geral, a vazão de esgoto tratado tende a ser maior em meses posteriores, mostrando um aumento progressivo ao longo do tempo, especialmente nos meses de março a junho de 2024, onde a vazão ultrapassa os 200 mil m³/mês. Essa tendência de aumento na vazão de esgoto tratado pode estar relacionada a fatores como maior volume de esgoto gerado, melhorias na eficiência do tratamento ou aumento da população atendida.

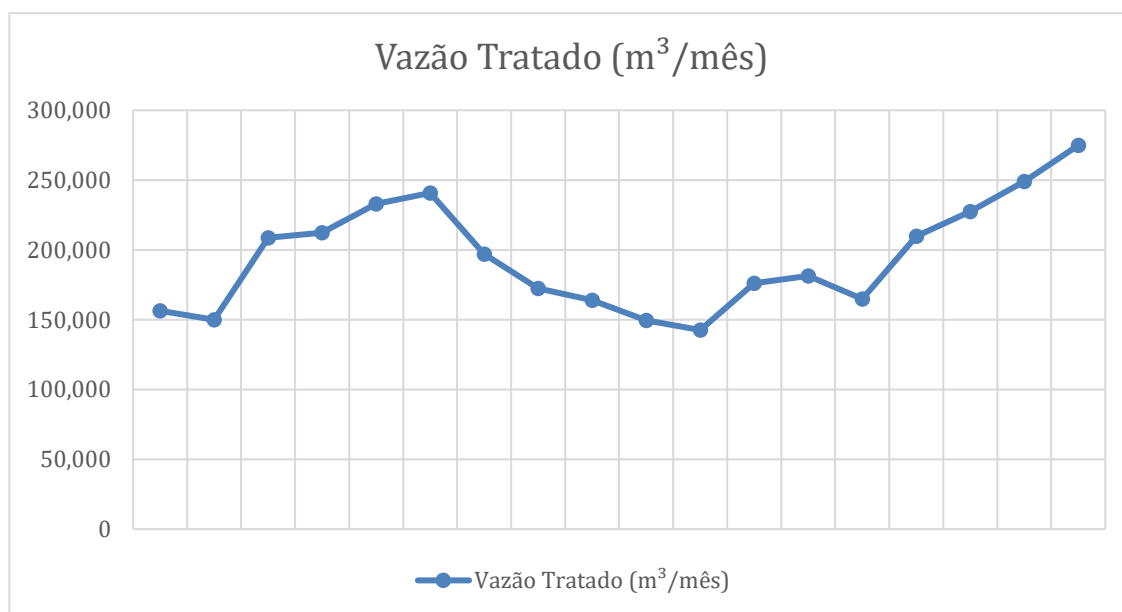
Por outro lado, a vazão de lodo adensado não apresenta um padrão tão consistente. Em alguns meses, como abril de 2023, a quantidade de lodo adensado é significativamente maior (1.268 m³) em comparação a meses com menor vazão de esgoto tratado, como maio de 2023 (539 m³). Isso indica que, embora a quantidade de esgoto tratado tenha aumentado, a relação com a geração de lodo adensado pode ser influenciada por diferentes fatores, como

a eficiência do processo de tratamento, variações na composição do esgoto e as técnicas utilizadas para o manejo do lodo.

Nos meses de janeiro a junho de 2024, é possível notar um aumento na vazão de lodo adensado, especialmente em janeiro de 2024 (1.537 m³). Esse aumento pode ser um reflexo do maior volume de esgoto tratado anteriormente, o que gera mais lodo. No entanto, a relação não é linear, e as variações mensais sugerem que outros fatores, como a desidratação do lodo e a estratégia de gestão, também desempenham papéis cruciais.

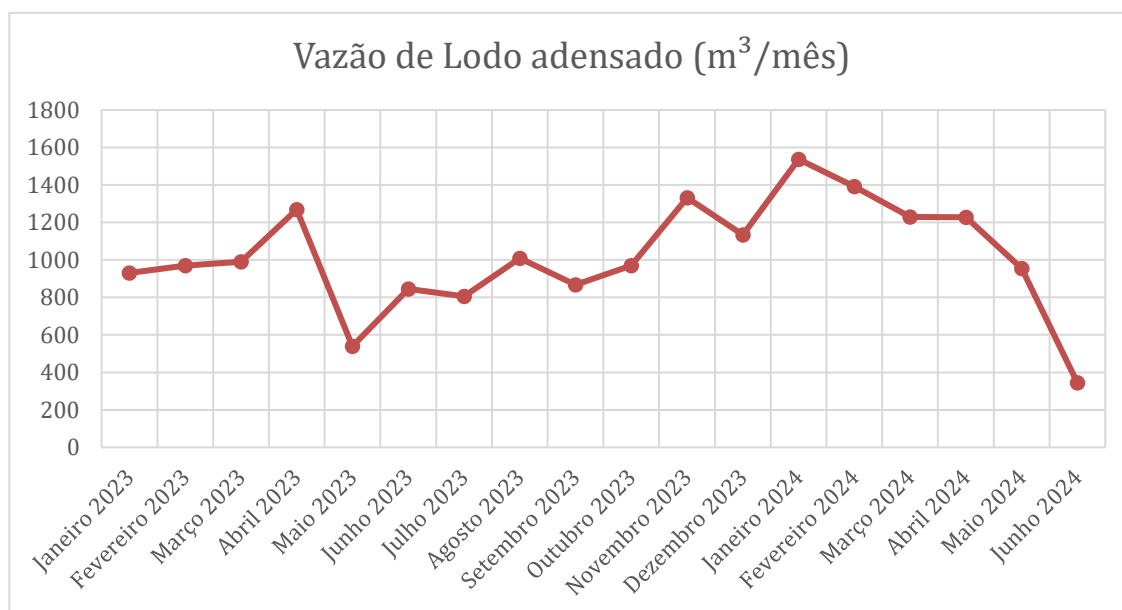
Em resumo, enquanto a vazão de esgoto tratado mostra uma tendência de crescimento, a vazão de lodo adensado apresenta flutuações, indicando que a relação entre esses dois parâmetros é complexa e influenciada por múltiplos fatores. Um monitoramento contínuo e uma análise mais profunda dos processos de tratamento são essenciais para entender melhor essa dinâmica e otimizar a gestão de esgoto e lodo em sistemas de saneamento.

Figura 10: Vazão tratada na ETE



Fonte: Autor (2024).

Figura 11: Vazão de lodo adensado



Fonte: Autor (2024).

- Lodo adensado x lodo desidratado

A análise dos dados mostra que, em geral, a geração de lodo desidratado (Figura 13) tende a aumentar conforme a vazão de lodo adensado cresce (Figura 12). Por exemplo, em abril de 2023, onde a vazão de lodo adensado atinge 1.268 m^3 , a geração de lodo desidratado chega a 171,79 toneladas, refletindo uma correlação positiva entre esses dois parâmetros. Isso sugere que um maior volume de lodo adensado está associado a um aumento na quantidade de lodo que pode ser desidratado.

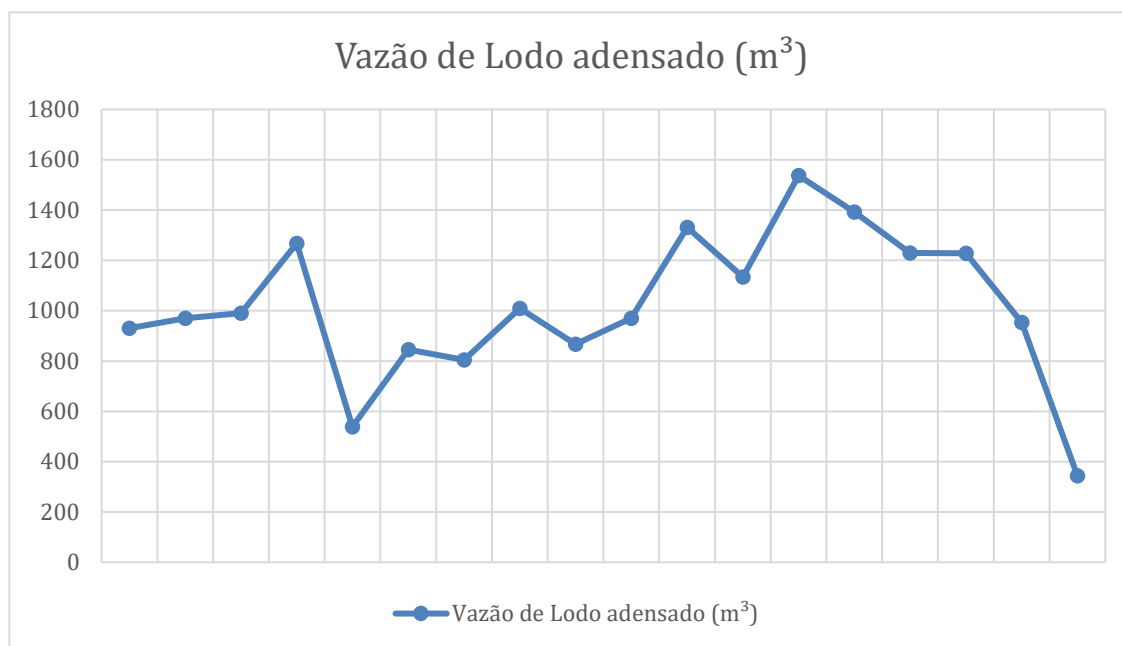
No entanto, essa relação não é sempre linear. No mês de maio de 2023, apesar de uma vazão de lodo adensado relativamente alta (539 m^3), a geração de lodo desidratado é baixa (63,84 toneladas). Esse comportamento pode indicar uma eficiência de desidratação que varia de acordo com as condições de operação ou a composição do lodo.

Ao longo do período, a vazão de lodo adensado e a geração de lodo desidratado apresentam flutuações significativas. Por exemplo, em janeiro de 2024, apesar de uma vazão de 1.537 m^3 , a geração é de 187,05 toneladas, enquanto em junho de 2024, a vazão diminuiu drasticamente para 344 m^3 , resultando em apenas 76,07 toneladas de lodo desidratado. Essas variações podem ser influenciadas por fatores como mudanças nas condições de

operação, a eficiência das máquinas de desidratação e a qualidade do lodo gerado.

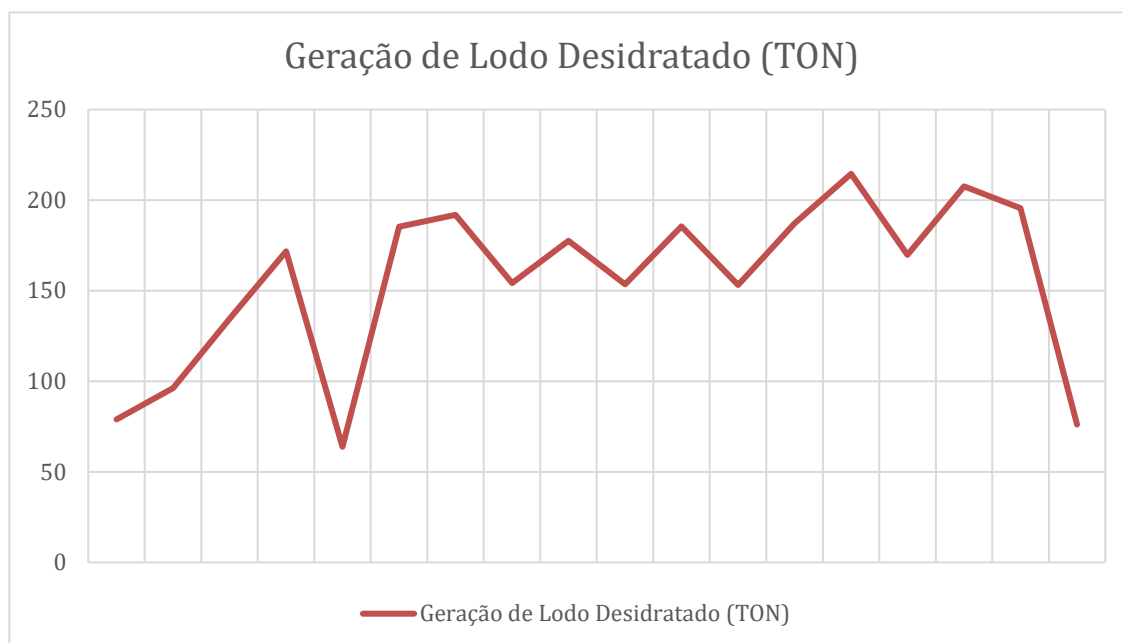
Em resumo, a relação entre a vazão de lodo adensado e a geração de lodo desidratado é complexa, mostrando uma tendência de correlação positiva, mas com variações que indicam a influência de múltiplos fatores operacionais. A compreensão dessa dinâmica é crucial para otimizar os processos de tratamento e desidratação, garantindo uma gestão eficiente do lodo gerado.

Figura 12: Vazão de lodo adensado



Fonte: Autor (2024).

Figura 13: Lodo desidratado



Fonte: Autor (2024).

- Utilização do polímero

Na análise dos dados apresentados, fica evidente o impacto do polímero na desidratação do lodo, especialmente considerando que ele é adicionado condicionamento, após o processo de adensamento, para a posterior centrifugação. A quantidade de polímero utilizada está diretamente relacionada à eficácia do processo, influenciando tanto a vazão de lodo adensado quanto a geração de lodo desidratado.

Observando os dados, notamos que, por exemplo, em casos onde foram utilizados 225 kg de polímero, a geração de lodo desidratado varia de 134,51 a 171,79 toneladas. Isso demonstra que a adição de uma quantidade adequada de polímero, mesmo em condições de adensamento variáveis, leva a um aumento significativo na eficiência de desidratação. Além disso, o consumo de polímero por tonelada de material seco (TMS) também mostra uma tendência: em alguns casos, como com 225 kg de polímero, o consumo foi mais alto (7,14 kg/TMS), correlacionando-se com uma maior geração de lodo desidratado.

Quando analisamos a relação entre a quantidade de polímero e a vazão de lodo adensado, percebemos que um aumento no volume de lodo adensado

geralmente acompanha o aumento na quantidade de polímero. Por exemplo, a vazão de 1.537 m³ acompanhada de 450 kg de polímero resulta em 187,05 toneladas de lodo desidratado, indicando que a presença do polímero é essencial para maximizar a densidade e o volume de lodo tratado.

Por outro lado, casos com menores quantidades de polímero, como os 100 kg utilizados, mostram uma geração de lodo desidratado menor (63,84 toneladas) e um consumo relativamente baixo (4,73 kg/TMS), o que sugere uma eficiência reduzida no processo de desidratação.

Assim, a análise dos dados revela que a adição de polímero na centrífuga, após o adensamento, é crucial para maximizar a eficiência do tratamento de lodo. Quantidades maiores de polímero não apenas aumentam a geração de lodo desidratado, mas também permitem um melhor desempenho na vazão de lodo adensado, confirmando a importância do polímero no processo de desidratação e manejo do lodo.

5.3 VIABILIDADE DO USO DO LODO NA AGRICULTURA

O lodo de esgoto é normalmente destinado a aterros sanitários. Para a Companhia de saneamento estudada, o local mais próximo para essa disposição é a CTR Maceió e CTR Pilar. No entanto, o custo dessa operação é elevado, pois a CTR cobra cerca de R\$ 84,00 por tonelada. Considerando que a produção diária de lodo na ETE pode chegar a aproximadamente 7,13 toneladas, os gastos mensais alcançam aproximadamente R\$ 17.976,00. Este valor não inclui outros custos logísticos envolvidos na destinação, como o desgaste das estradas e dos veículos, salários, combustível e despesas com a equipe responsável.

O reaproveitamento do lodo gerado nas ETEs visa promover a sustentabilidade ambiental e reduzir custos operacionais, transformando um resíduo problemático em um recurso útil. Entre as alternativas de reaproveitamento, destaca-se o uso agrícola, aproveitando o lodo como fertilizante rico em nutrientes. Dessa forma, é necessário analisar a viabilidade técnica e econômica dessa prática, levando em conta os investimentos necessários, os potenciais benefícios financeiros e o impacto ambiental positivo, como parte de uma estratégia de economia circular.

A reciclagem agrícola envolve assegurar o fornecimento de insumos de alta qualidade para a agricultura, por meio de uma seleção cuidadosa de áreas e

culturas apropriadas, acompanhada da orientação técnica correta para os produtores rurais e da realização de um monitoramento ambiental (Santos, 2007). Para isso, o lodo deve ser tratado para reduzir os riscos de contaminação microbiológica, sendo necessária a estabilização por processos como digestão anaeróbia, compostagem ou secagem térmica, para diminuir os patógenos a níveis seguros (CETESB, 1999).

O processo de estabilização exige equipamentos para desidratação (como centrífugas e filtros prensa) e, em muitos casos, um sistema de compostagem ou digestão anaeróbia. No caso da ETE estudada, ela já possui equipamentos para a desidratação do lodo, sendo uma vantagem, pois esses processos são parte essencial da preparação do lodo para o uso agrícola.

Para analisar a viabilidade da utilização do lodo como bio-sólido, foi realizado um levantamento de estudos que utilizaram o lodo de esgoto como fertilizante agrícola no Brasil (Tabela 6). Esses estudos investigaram diferentes aspectos do uso do lodo, como sua influência na fertilidade do solo, na nutrição de culturas diversas e nos parâmetros produtivos de diferentes plantas. A tabela a seguir apresenta uma síntese dos principais achados desses estudos, destacando os objetivos, resultados e referências das pesquisas. Esse levantamento evidencia a viabilidade do lodo de esgoto como uma alternativa sustentável para a fertilização agrícola, contribuindo para a reciclagem de nutrientes e a melhoria das propriedades do solo.

Tabela 6: Estudos do uso do lodo como fertilizante agrícola.

Estudo	Objetivo	Principais resultados	Referências
Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero	Avaliar o uso do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para o desenvolvimento do sorgo granífero	Nutrientes do lodo foram absorvidos pelo sorgo; doses superiores a 20 t/ha melhoram o desenvolvimento do sorgo	OLIVEIRA, F.C.; MARQUES, M.O.; BELLINGIERI, P.A.; PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. Jaboticabal, SP: FCAV/UNESP, 1995.
Produtividade de milho e de feijão consorciados adubados com diferentes formas de lodo de esgoto	Avaliar o impacto do lodo de esgoto desidratado e tratado com cal, coletado na ETE de Juramento-MG, no cultivo consorciado de milho e feijão	Lodo tratado com cal aumentou a alcalinidade do solo; adição de lodo aumentou a concentração de nutrientes; milho crioulo e feijão trepador não foram influenciados pela adubação convencional	NOGUEIRA et al. (2006),

Estudo	Objetivos	Principais resultados	Referências
Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto	Avaliar se a aplicação de biossólido proveniente da ETE de Barueri-SP melhora as propriedades químicas do solo e favorece a absorção de nutrientes em <i>Eucalyptus grandis</i> em fase inicial de crescimento	A aplicação de biossólido alcalino melhora as propriedades químicas do solo, reduzindo a acidez e aumentando a disponibilidade de nutrientes. O biossólido alcalino pode ser usado como corretivo da acidez e fonte de nutrientes para o eucalipto; doses até 40 t/ha não causam efeito condicionador significativo após um ano	GUEDES et al. (2006)
Avaliação agronômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho	Avaliar a aplicação de biossólidos tratados quimicamente em Latossolo Vermelho distrófico, visando a produção de matéria seca e absorção de nutrientes pela cultura do milho	Adição de biossólido aumentou os teores de macronutrientes e a matéria seca no milho; ácido peracético com cal (APA20C) teve o melhor efeito na redução de patógenos e maior produção de matéria seca	BARROS et al. (2011)

Estudo	Objetivos	Principais resultados	Referências
Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol	Avaliar o efeito do lodo de esgoto compostado com bagaço de cana e do nitrogênio nos parâmetros produtivos do girassol, considerando diferentes manejos de aplicação ao longo de seis cultivos em rotações de culturas	Aumento da dose de lodo e N elevou o rendimento de grãos, óleo, peso de 1000 sementes e matéria seca do girassol; doses crescentes de lodo resultaram em incremento no teor de óleo, seguido de decréscimo acentuado	LOBO et al. (2013)
Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto	Avaliar a utilização do lodo de esgoto da ETE de Barueri-SP como fonte de nutrientes para a cultura do girassol, comparando-o à adubação mineral e observando variações na fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade por dois anos consecutivos	Lodo de esgoto mostrou-se viável para o girassol, com produtividade equivalente à adubação mineral, desde que complementado com potássio; efeito residual de P importante e matéria orgânica favoreceu a disponibilidade de P	RIBEIRINHO et al. (2012)

Fonte: Autor (2024).

5.4 PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO

Para implementar o uso do lodo de esgoto como insumo agrícola e na recuperação de áreas degradadas, é necessário um plano cuidadoso que considere regulamentações ambientais, tratamentos específicos, análise de solo e lodo, e monitoramento contínuo. Atualmente, Alagoas carece de legislação ou documentação específica que regule o uso do lodo. No entanto, em nível nacional, existem diretrizes que orientam essa prática, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) e a Resolução CONAMA 498/2020. Essas normativas definem critérios para o uso seguro do lodo na agricultura, estabelecendo limites para a presença de metais pesados e exigindo tratamentos adequados para minimizar a contaminação por patógenos.

A utilização de lodo de esgoto como biossólido para fins agrícolas deve estar em estrita conformidade com a Resolução CONAMA 498, que estabelece os requisitos mínimos de qualidade para o lodo de esgoto ou seus produtos derivados. Essa norma é fundamental para garantir que o lodo a ser utilizado atenda a parâmetros de segurança e qualidade, minimizando riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Para atender a essa resolução, o lodo deve passar por análises específicas que verifiquem a concentração de substâncias inorgânicas, garantindo que os níveis de contaminantes não ultrapassem as concentrações máximas permitidas. Para aplicar biossólidos provenientes de esgoto doméstico de maneira segura e dentro das diretrizes da Resolução CONAMA nº 498/2020, vários procedimentos devem ser seguidos para proteger o meio ambiente e a saúde pública.

Em resumo, a Figura mostra as principais etapas para a utilização do lodo como biossólido.

Figura 14: Principais etapas do uso do lodo como biossólido.



Fonte: Autor (2024).

Primeiramente, o biossólido deve ser tratado para reduzir significativamente patógenos e minimizar a atratividade para vetores (como insetos). Esse tratamento pode ser feito por meio de digestão aeróbia e anaeróbia, compostagem ou processos de estabilização química. Esses métodos devem atingir parâmetros específicos de temperatura e tempo, com requisitos, por exemplo, de manter a temperatura mínima durante um período estabelecido, para garantir a inativação dos agentes patogênicos. Além disso, deve-se verificar que a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais do biossólido esteja abaixo do limite de 0,65, o que indica uma biomassa suficientemente estável e menos atrativa para vetores.

Outro aspecto essencial é a análise da composição química do biossólido, que deve atender a limites rigorosos de substâncias químicas, como arsênio,

bário, cádmio, chumbo, cobre, mercúrio e zinco, entre outros metais pesados. Esses limites variam entre as classes do bioossólido: na Classe 1, os valores permitidos são mais baixos, permitindo uma aplicação menos restritiva; já na Classe 2, os valores são mais altos e requerem mais cuidados. Em ambos os casos, é obrigatório seguir limites específicos tanto para a taxa máxima anual de aplicação no solo quanto para a carga acumulada, especialmente em áreas não degradadas e agrícolas, para evitar a acumulação de metais pesados que possam impactar a fertilidade do solo e a segurança das culturas.

Os limites estabelecidos para alguns dos principais contaminantes são:

Tabela 7: Limite dos contaminantes dos bioossólidos.

Elemento	Limite Classe 1 (mg/kg ST)	Limite Classe 2 (mg/kg ST)
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1500	4300
Cromo	1000	3000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2800	7500

Fonte: Autor (2024).

O uso do bioossólido também requer um projeto técnico ou agrônomo que identifique a área e tipo de cultura que receberão o material. Além disso, o responsável pela aplicação deve assinar um termo de compromisso, garantindo o cumprimento das práticas estabelecidas, e documentar todas as atividades, incluindo as quantidades de bioossólido aplicadas, os métodos utilizados e as análises químicas realizadas. Esses registros são importantes para monitoramento e auditoria ambiental.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos, com alta eficiência na remoção de contaminantes (93,87% para DBO e 86,25% para DQO), comprovam a efetividade do tratamento de esgoto na ETE estudada e sugerem que esses processos podem ser ampliados para otimizar o uso de resíduos sólidos. Além disso, o uso de polímeros no tratamento do lodo mostrou-se eficaz para melhorar a desidratação e facilitar o manuseio, reforçando a viabilidade econômica da prática.

Assim, a implementação das recomendações apresentadas pode representar um avanço significativo na gestão de subprodutos sólidos de ETEs, tornando-as mais eficientes e sustentáveis.

Além disso, diante da quantidade de lodo gerada na ETE, que pode chegar a aproximadamente 214 toneladas por mês, e considerando que a ETE ainda está operando com apenas 30% de sua capacidade total, é evidente que a produção de lodo tende a crescer significativamente no futuro. Nesse contexto, a reciclagem do lodo apresenta-se como uma alternativa viável e sustentável, especialmente porque a ETE já possui equipamentos de secagem e um espaço de jardinagem com árvores, onde o biossólido pode ser utilizado.

Entretanto, é imprescindível realizar análises mais específicas quanto à presença de substâncias inorgânicas e patógenos no lodo, a fim de determinar se ele requer tratamentos adicionais, conforme estipulado pela legislação vigente. Essas análises garantirão que o lodo a ser reciclado atenda aos padrões de segurança e qualidade exigidos para sua aplicação agrícola.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004: Resíduos sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12209: Estações de tratamento de esgoto sanitário - Projeto e construção. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Panorama dos Resíduos Sólidos do Brasil. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 10 fev. 2024.
- ALMEIDA, Carlos F. et al. Desidratação e Reutilização de Lodo. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 14350-14363, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-13648-7>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- ANDRADE NETO, Cícero Onofre de; CAMPOS, José Roberto. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- BARROS, I. T. Avaliação agronômica de bioresíduos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. 2011.
- BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier. Subsídios à regulamentação do reúso da água no Brasil. *Revista DAE*, 2008.
- BORGES, Nayara Batista. Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2014.
- BORGES, Nayara Batista; CAMPOS, José Roberto; PABLOS, Javier Mazariegos; FERREIRA, Gilcimar Trento. Potencialidade da utilização da areia removida em desarenadores de estação de tratamento de esgoto na construção civil, como material alternativo à areia comercial comum. *Revista DAE*, 2016.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas: critérios para projeto e operação. São Paulo: CETESB, 1999.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba: PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Uso e manejo do lodo na agricultura. PROSAB, Curitiba, 1999.

GEHLING, Gino Roberto. Tratamento de Água e Esgoto. Capítulo 10. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Departamento de Obras Hidráulicas, IPH 02058: Tratamento de Água e Esgoto. Engenharia Hídrica, 2017.

GONÇALVES, Ricardo Franci. Desinfecção de efluentes sanitários. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

GONÇALVES, R. F. et al. Desidratação de lodo de esgotos. In: PROSAB. Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários. Curitiba: PROSAB, 2001.

GUEDES, M. C. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. 2006.

HENDGES, L. T.; REJEI REINHER, R. C.; LEICHTWEIS, J.; FERNANDES, É. J.; TONES, A. R. M. Disposição final de lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: uma revisão. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>. Acesso em: 10 fev. 2024.

JORDÃO, Eduardo Pacheco. Processos de tratamento secundário de esgotos. In: PESSÔA, Constantino Arruda (Ed.). Tratamento de Esgotos Domésticos. São Paulo: Editora ABC, 2017. p. 37, 151-152, 183-185, 213-215, 467-471, 513-516, 856, 291.

LOBO, T. F. Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol. 2013.

MENDONÇA, Neyson Martins. Gerenciamento de subprodutos sólidos do tratamento de esgotos em empreendimentos habitacionais. In: SANTOS, André Bezerra dos et al. Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregadas e Não Segregadas em Empreendimentos Habitacionais. Fortaleza: Impreco, 2019. p. 496, 493, 498-500, 664-665.

MENDES, Ana C. et al. Incineração de Lodos e Poluentes Atmosféricos. Journal of Hazardous Materials, v. 397, p. 122774, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7527622/>. Acesso em: 18 ago. 2024.

NOGUEIRA, T. A. R. Produtividade de milho e de feijão consorciados adubados com diferentes formas de lodo de esgoto. Montes Claros, MG: UFMG, 2006.

NOZELA, Weverton Campos. Caracterização do lodo de esgoto, após desaguamento e secagem térmica, da Estação de Tratamento de Esgoto de

Araraquara. 2014. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Instituto de Química, 2014.

OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. Jaboticabal, SP: FCAV/UNESP, 1995.

OLIVEIRA, Pedro H. et al. Benefícios e Desafios da Compostagem. *Applied Sciences*, v. 10, n. 19, p. 6834, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/19/4060>. Acesso em: 18 ago. 2024.

PAREDES FILHO, M. V. Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola. *Revista Agrogeoambiental*, v. 3, n. 3, 2011. DOI: 10.18406/2316-1817v3n32011364. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/364>. Acesso em: 1 nov. 2024.

PEREIRA, José M. et al. Impactos Ambientais dos Aterros Sanitários. *Journal of Environmental Management*, v. 279, p. 111645, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X2100137X>. Acesso em: 18 ago. 2024.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, Arilza de Castilho; LEAL, Edina Ruth Mendes; MILHOMEN, Cleide da Cruz. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. *Revista Liberato (Novo Hamburgo)*, v. 11, p. 147-157, 2010. Disponível em: http://revista.liberato.com.br/ojs_lib/index.php/revista/article/view/160. Acesso em: 04 mar. 2023.

REDE NACIONAL DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. Processos de tratamento de esgotos. 1. ed. Brasília: ReCESA, 2008.

SILVA, Ricardo A. et al. Uso de Lodo na Agricultura e Riscos Associados. *Science of The Total Environment*, v. 684, p. 264-273, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517315269>. Acesso em: 18 ago. 2024.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. Belo Horizonte, MG: DESA; UFMG, 2005. p. 59-63.

WEF – Water Environment Federation. Preliminary treatment for waste water for facilities. *Water Environment Federation Manual of Practice OM-2*. Alexandria: Water Environment Federation, 1994, p.164.

ANEXO A – TABELAS DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Tabela 8: Demanda Bioquímica de oxigênio

Período	DBO efluente bruto (mg/L)	DBO efluente tratado (mg/L)
Janeiro 2023	310,2	16,5
Fevereiro 2023	335,1	15,1
Março 2023	348,1	25,0
Abril 2023	320,1	30,9
Maio 2023	396,9	23,5
Junho 2023	233,6	15,4
Julho 2023	296,2	19,9
Agosto 2023	394,1	12,7
Setembro 2023	296,8	22,5
Outubro 2023	469,5	17,7
Novembro 2023	338,4	25,7
Dezembro 2023	414,8	21,4
Janeiro 2024	361,6	21,3
Fevereiro 2024	355,7	20,4
Março 2024	443,8	38,1
Abril 2024	300,5	17,4
Maio 2024	219,6	8,3
Junho 2024	386,0	28,2

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9: Demanda química de oxigênio

Período	DQO efluente bruto (mg/L)	DQO efluente tratado (mg/L)
Janeiro 2023	779,0	104,0
Fevereiro 2023	868,5	90,5
Março 2023	772,4	116,6
Abril 2023	648,5	104,8
Mai 2023	992,3	87,8
Junho 2023	440,3	92,8
Julho 2023	554,8	111,8
Agosto 2023	887,0	92,0
Setembro 2023	716,0	126,3
Outubro 2023	1256,5	109,3
Novembro 2023	936,3	109,0
Dezembro 2023	1022,3	91,3
Janeiro 2024	842,0	92,0
Fevereiro 2024	801,3	90,8
Março 2024	886,8	116,8
Abril 2024	701,0	96,5
Mai 2024	447,8	73,8
Junho 2024	625,3	121,0

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10: Nitrogênio Amoniacal

Período	Nitrogênio Amoniacal de entrada (mg/L)	Nitrogênio Amoniacal de saída (mg/L)
Janeiro 2023	36,6	16,0
Fevereiro 2023	39,5	14,9
Março 2023	39,9	16,6
Abril 2023	38,6	15,6
Mai 2023	37,8	10,8
Junho 2023	33,5	5,6
Julho 2023	38,4	8,0
Agosto 2023	34,8	10,5
Setembro 2023	35,4	19,4
Outubro 2023	36,3	25,0
Novembro 2023	26,4	26,2
Dezembro 2023	36,8	24,9
Janeiro 2024	40,3	23,8
Fevereiro 2024	44,2	23,1
Março 2024	45,6	21,7
Abril 2024	35,3	19,1
Mai 2024	40,8	12,9
Junho 2024	42,3	19,8

Fonte: Autor (2024).

Tabela 11: Fósforo Total

Período	Fósforo Total de entrada(mg/L)	Fósforo Total de saída (mg/L)
Janeiro 2023	7,13	4,38
Fevereiro 2023	7,76	2,89
Março 2023	8,65	2,60
Abril 2023	9,08	3,36
Mai 2023	10,97	1,99
Junho 2023	8,44	1,28
Julho 2023	9,69	2,56
Agosto 2023	8,83	1,96
Setembro 2023	9,33	4,05
Outubro 2023	10,48	4,07
Novembro 2023	7,29	3,85
Dezembro 2023	8,68	3,45
Janeiro 2024	6,98	2,72
Fevereiro 2024	9,49	3,07
Março 2024	9,64	3,42
Abril 2024	6,55	2,13
Mai 2024	6,34	1,84
Junho 2024	8,65	3,44

Fonte: Autor (2024).

Tabela 12: Sólidos Suspensos Totais

Período	SST efluente bruto (mg/L)	SST efluente tratado (mg/L)
Janeiro 2023	232	68
Fevereiro 2023	434	62
Março 2023	210	118
Abril 2023	212	88
Mai 2023	864	16
Junho 2023	134	74
Julho 2023	86	32
Agosto 2023	314	10
Setembro 2023	314	8
Outubro 2023	1380	60
Novembro 2023	36	48
Dezembro 2023	348	52
Janeiro 2024	396	42
Fevereiro 2024	346	58
Março 2024	515	65
Abril 2024	314	26
Mai 2024	146	18
Junho 2024	102	70

Fonte: Autor (2024).