

UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO
PROCESSOS TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS

ALEX EDUARDO JORGE MACEDO

**PROPOSTA DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO PARA O LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE) DO MUNICÍPIO DE
VOTORANTIM/SP**

Sorocaba/SP
2025

ALEX EDUARDO JORGE MACEDO

Proposta de tratamento e destinação para o Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Município de Votorantim/SP

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Processos Tecnológicos e Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Angela Faustino Jozala

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Denise Grotto

Sorocaba/SP
2025

Ficha Catalográfica

M119p Macedo, Alex Eduardo Jorge
Proposta de tratamento e destinação para o lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do município de Votorantim/SP / Alex Eduardo Jorge Macedo. – 2025.
92 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Angela Faustino Jozala
Coorientadora: Profa. Dra. Denise Grotto
Tese (Doutorado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2025.

1. Resíduos sólidos. 2. Lodo residual – Tratamento. 3. Lodo residual – Eliminação. 4. Biorremediação. 5. Estações de tratamento de esgoto. 6. Saneamento. I. Jozala, Angela Faustino, orient. II. Grotto, Denise, coorient. III. Universidade de Sorocaba. IV. Título.

Elaborada por Regina Célia Ferreira Boaventura – CRB-8/6179.

ALEX EDUARDO JORGE MACEDO

**PROPOSTA DE TRATAMENTO E DESTINAÇÃO PARA O LODO
DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)
DO MUNICÍPIO DE VOTORANTIM/SP**

Tese apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Doutor(a) em Processos Tecnológicos e Ambientais.

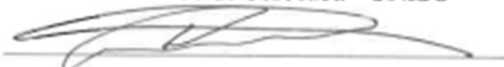
Aprovado: 24/06/2025

BANCA EXAMINADORA



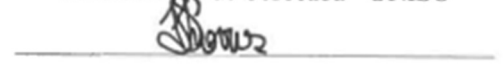
Prof. Dra. Angela Faustino Jozala

Universidade de Sorocaba - UNISO



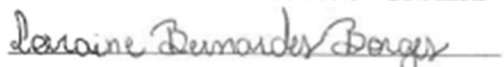
Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves

Universidade de Sorocaba - UNISO



Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes

Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP



Prof. Dra. Lorraine Bernardes Borges

Faculdade de Tecnologia de Sorocaba - FATEC

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos pais falecidos do autor, cujo apoio constante ao processo de aprendizado foi fundamental, bem como à esposa e filhos do autor, que acompanharam de perto todo o desenvolvimento e progresso deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha gratidão à Deus, à minha esposa Cláudia Hallack Cobucci Macedo e aos meus filhos Thiago Cobucci Macedo e Matheus Cobucci Macedo pela compreensão e apoio durante todo o processo. Também desejo registrar meus sinceros agradecimentos aos meus pais Sr. Emérito Valle de Macedo e Sra. Maria Lúcia Jorge Macedo, que estão em memória, por não medir esforços para que eu tivesse a oportunidade de frequentar excelentes instituições de ensino e por compartilharem seu conhecimento e sabedoria ao longo da minha jornada.

Agradeço a minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Angela Jozala e coorientadora Prof.^a Dr.^a Denise Grotto pela confiança depositada no meu trabalho.

Aos demais professores da Pós-graduação em Processos Tecnológicos Ambientais, em especial ao Prof. Dr. Daniel Bertoli Gonçalves e à Coordenadora Prof.^a Dr.^a Valquiria Miwa Hanai Yoshida pelo apoio e direcionamento.

Ao Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes da UNAERP e a Prof.^a Dr.^a Lorraine Bernardes Borges da FATEC pelo incentivo e apoio durante todo o caminho percorrido.

À laboratorista da Empresa Águas de Votorantim, Lais Carolina da Silva e as demais bolsistas do laboratório da UNISO que muito contribuíram durante à fase dos ensaios ali realizados.

À secretária do Programa de Pós- Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, Sra. Cláudia Neres de Meira Andrade por toda assessoria prestada.

Ao Grupo Águas do Brasil S/A, ao qual pertenço e a Empresa Águas de Votorantim S/A, que através da parceria possibilitou a realização desse trabalho.

“Cada um constrói, dia por dia, hora por hora, muitas vezes sem mesmo saber, o seu próprio futuro. A sorte que nos cabe na vida atual foi preparada pelas nossas anteriores; da mesma forma, edificamos no presente as condições da existência futura. ” (Leon Denis)

RESUMO

A gestão do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é um desafio ambiental e logístico crescente, sobretudo em municípios com alta densidade populacional e acelerado crescimento urbano, como Sorocaba e Votorantim. Esses resíduos, embora ricos em matéria orgânica e nutrientes, também apresentam elevada carga microbiológica e possíveis contaminantes, exigindo tratamento eficaz antes de qualquer destinação final. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) reforça a necessidade de estratégias sustentáveis e integradas para o manejo desses resíduos. Nesse contexto, esta tese investigou a biorremediação com *Bacillus subtilis* como alternativa economicamente viável, ambientalmente segura e tecnicamente eficaz para o tratamento de lodo de esgoto, associada a um modelo de gestão que inclui o uso de polímeros no adensamento do lodo. Foram realizados ensaios microbiológicos com diferentes concentrações do microrganismo e diluições do lodo, com tempos de exposição de 2 a 16 dias. Os resultados mostraram que a aplicação do *Bacillus subtilis* em diluição de 5% com tempo de incubação de 2 dias apresentou melhor desempenho, com redução de até 2,4 vezes nas unidades formadoras de colônia (UFC) de coliformes fecais e redução significativa de *Escherichia coli*, coliformes totais e enterococos. Os ensaios físico-químicos revelaram que os parâmetros de pH, matéria orgânica, nutrientes e metais pesados estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes. Foi observado aumento na contagem de bactérias heterotróficas, possivelmente devido à própria natureza do *Bacillus subtilis*, o que não comprometeu a qualidade sanitária do lodo tratado. Comparado a métodos tradicionais, como compostagem e incineração, o processo de biorremediação demonstrou-se mais eficiente em termos de custo, tempo (2 dias de incubação) e viabilidade operacional. Conclui-se que a biorremediação com *Bacillus subtilis* é uma alternativa promissora para o tratamento de lodo de esgoto, promovendo a redução de patógenos e possibilitando o reaproveitamento seguro do resíduo. A proposta contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, em especial os objetivos relacionados à saúde pública, saneamento básico, produção e consumo sustentáveis e ação contra a mudança climática.

Palavras-chave: resíduos sólidos, saneamento básico, lodo de ETE, tratamento, destinação.

ABSTRACT

The management of sludge generated at Wastewater Treatment Plants is an increasing environmental and logistical challenge, especially in municipalities with high population density and rapid urban growth, such as Sorocaba and Votorantim. Although these residues are rich in organic matter and nutrients, they also contain a high microbial load and potential contaminants, requiring effective treatment before any final disposal. The Brazilian National Solid Waste Policy (Law No. 12,305/2010) reinforces the need for sustainable and integrated strategies for managing such waste. In this context, this dissertation investigated bioremediation using *Bacillus subtilis* as an economically viable, environmentally safe, and technically effective alternative for sewage sludge treatment, combined with a management model that includes the use of polymers in sludge thickening. Microbiological tests were carried out with different concentrations of the microorganism and sludge dilutions, with exposure times ranging from 2 to 16 days. The results showed that applying *Bacillus subtilis* in a 5% dilution with a 2-day incubation period achieved the best performance, reducing fecal coliform colony-forming units by up to 2.4 times and significantly decreasing levels of *Escherichia coli*, total coliforms, and enterococci. Physicochemical analyses revealed that parameters such as pH, organic matter, nutrients, and heavy metals were within the limits established by current regulations. An increase in heterotrophic bacteria count was observed, likely due to the nature of *Bacillus subtilis* itself, without compromising the sanitary quality of the treated sludge. Compared to traditional methods such as composting and incineration, the bioremediation process proved to be more efficient in terms of cost, time (2 day incubation), and operational feasibility. It is concluded that bioremediation with *Bacillus subtilis* is a promising alternative for sewage sludge treatment, promoting pathogen reduction and enabling the safe reuse of the waste. This proposal contributes directly to the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda, particularly those related to public health, basic sanitation, sustainable production and consumption, and climate action.

Keywords: solid waste, basic sanitation, Wastewater Treatment Plants, treatment, disposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Blocos com as estratégias para o resíduo de serviços públicos de saneamento básico	29
Figura 2 - Procedimento de coleta do lodo sendo em A a coleta de lodo realizada no ponto de descarte (armazenamento) na caçamba in loco na unidade; B as alíquotas de lodo sendo armazenadas nos recipientes para análise.....	46
Figura 3 - Coleta inicial de lodo da ETE A em 20.03.2024	47
Figura 4 - Vista superior das etapas de tratamento de esgoto sendo, A entrada da ETE Salto do Guimarães; B vista superior da etapa de tratamento preliminar da unidade; C vista superior dos reatores e D vista superior da unidade.....	55
Figura 5 - Etapas seguintes para a unidade de tratamento do lodo da ETE Salto do Guimarães, sendo A Casa de sopradores, B adensadores etapa de tratamento do lodo, C tanque de preparo da solução de polímero para etapa de tratamento do lodo e D centrifugas	57
Figura 6 - Vista do laboratório de microbiologia, sendo A vista externa do laboratório de microbiologia e B vista interna do laboratório de microbiologia.....	58
Figura 7 - Levantamento do custo com transporte do lodo da ETE	60
Figura 8 - Levantamento do custo com destinação do lodo da ETE	60
Figura 9 - Tanque de preparo da solução de Polímero existente na unidade	70
Figura 10 - Fluxograma resumo de licenciamento e disposição do lodo de ETE	74
Figura 11 - Fluxograma do Processo de Comercialização	77
Figura 12 - Fluxograma de viabilidade de mercado para o adubo orgânico	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de lodo gerado na ETE (t) nos anos de 2022 e 2023	61
Tabela 2 - Resultados físico-químicos referentes a caracterização do lodo da ETE A.....	62
Tabela 3 - Resultados microbiológicos referentes a caracterização do lodo da ETE A.....	63
Tabela 4 - Resultados de metais referentes a caracterização do lodo da ETE A.....	64
Tabela 5 - Resultado da análise de contagem de microrganismos após o tratamento do lodo com a suspensão de bacilos nas concentrações de 1%, 5% e 10% após 10 dias de tratamento.....	66
Tabela 6 - Resultados apresentados do segundo ciclo de ensaios no tratamento de 1 e 2 dias com diferentes concentrações dos bacilos	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos segundo a Resolução nº 05/1993 e Resolução CONAMA nº 23/1996	25
Quadro 2- Cores padronizadas para separação, armazenamento e transporte de resíduos, segundo a Resolução CONAMA nº 275/2001	25

LISTA DE SIGLAS

ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
LD	Limite de Detecção
LQ	Limite de Quantificação
NA	Não Aplicável
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
ODS	Objetivos Globais de Desenvolvimento Sustentável
PMGRIS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRG	Política Nacional de Resíduos Sólidos
UTL	Unidade de Tratamento de Lodo
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial Hidrogeniônico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ATAD	Digestão Aeróbica Terofílica Autotérmica
ETAR	Estação de Tratamento de Água de Reúso
UMTT	Misto urbano
DA	Anaeróbica
UTL	Unidade de Tratamento de Lodo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
LD	Limite de Detecção
LQ	Limite de Quantificação

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. OBJETIVOS	21
1.1. Objetivo Geral	21
1.2. Objetivos específicos.....	21
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1. Saneamento Básico	22
2.1.1. Conceitos básicos e saúde pública.....	22
2.1.2. Tipos de tratamentos de efluentes.....	23
2.1.3. Legislações aplicadas na área do saneamento básico	24
2.2. Técnica da biorremediação.....	29
2.2.1. As principais técnicas e organismos utilizados.....	30
2.3. Uso e destinação do lodo de ETE	32
2.3.1. Principais usos de técnicas para tratamento do lodo de ETE.....	33
2.4. Licenciamento ambiental para comercialização do lodo	35
2.5. Biorremediação aplicada ao lodo de ETE	37
2.5.1. Benefícios	38
2.5.2. Tecnologias Atuais	39
2.6. Proposta de utilização da <i>Bacillus subtilis</i>	40
2.6.1. Aplicações no âmbito nacional e internacional	42
2.7. Adensamento de lodo de ETE	43
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.1. Identificação e caracterização do lodo de ETE.....	46
3.2. Avaliação das características físico – químicas e bacteriológicas do lodo e sua caracterização	48
3.2.1. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.....	49
3.2.2. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos	49
3.2.3. Espectrometria de massa acoplada à espectrometria de absorção atômica.....	50
3.2.4. Método de centrifugação para análise microbiológica	50
3.2.5. Extração líquido-líquido por funil separatório.....	50
3.2.6. Determinação da umidade por métodos gravimétricos.....	51
3.2.7. Cultivo de <i>Bacillus subtilis</i>	51
3.2.8. Análise de biorremediação	51
3.2.9. Metodologia para identificação de <i>Escherichia coli</i> , coliformes totais, bactérias heterotróficas e <i>Enterococcus</i> utilizando o Papel 3M™ Petrifilm™.....	52
3.3. Avaliação da biotecnologia de biorremediação como alternativa para tratamento do lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	52
3.4. Verificação e proposta de processo para licenciamento da unidade de tratamento de lodo (UTL) e sua destinação	53

3.5.	Pesquisa e elaboração de proposta de mercado para a destinação final do resíduo.....	54
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1.	Caracterização da Estação de Tratamento de Esgoto A.....	55
4.1.1.	Controle do Processo de Tratamento de Esgoto.....	57
4.2.	Destinação do Lodo da ETE	59
4.2.1.	Custos Financeiros.....	60
4.3.	Resultados da Avaliação das Características Físico-Químicas e Bacteriológicas do Resíduo e Sua Caracterização	62
4.3.1.	Tratamento do Lodo com Bacilos – Processo de Biorremediação	65
4.4.	Avaliação da Biotecnologia de Biorremediação como Alternativa para o Tratamento do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)	70
4.5.	Verificação do processo de licenciamento	72
4.6.	Pesquisa e Elaboração de Proposta de Mercado para a Destinação Final do Resíduo como Produto Comercializável ou por Meio de Acordos Cooperativos	74
4.6.1.	Benefícios Ambientais e Econômicos do Uso do Lodo Tratado como Fertilizante Orgânico.....	75
4.6.2.	Implicações Econômicas para a Agricultura Local e a Gestão de Resíduos.....	75
4.6.3.	Aspectos Logísticos e Operacionais do Fornecimento a Granel.....	76
4.6.4.	Fluxo Logístico e Distribuição do Adubo Orgânico.....	76
5.	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A – FOTOS DOS PRIMEIROS ENSAIOS DE ESTUDO QUE FORAM EXECUTADOS COM SUBSTRATO, BAGAÇO E BACILOS	90
	ANEXO B – TABELAS DE RESULTADOS.....	92

INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos resíduos gerados pelas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), em particular o lodo resultante desse processo, configura-se como uma questão urgente e prioritária nos setores de saneamento e preservação ambiental.

Com o crescimento constante da população urbana e a expansão das infraestruturas de saneamento, a quantidade de lodo gerado pelas ETEs aumentou consideravelmente, atingindo níveis significativos. Esse aumento reflete diretamente a maior demanda por tratamento de esgoto, especialmente em áreas metropolitanas submetidas a processos acelerados de urbanização.

O lodo gerado durante o processo de tratamento de esgoto apresenta uma quantidade substancial de matéria orgânica, nutrientes essenciais como nitrogênio e fósforo, além de substâncias potencialmente tóxicas e patogênicas.

A gestão responsável e sustentável do lodo oriundo das ETEs tornou-se, portanto, uma prioridade complexa que demanda o aprofundamento de pesquisas na área. As abordagens tradicionais de tratamento, como a disposição em aterros sanitários ou a incineração, mostraram-se insuficientes para lidar com o crescente volume de resíduos e os impactos ambientais associados.

A necessidade de alternativas mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente é cada vez mais evidente, justificando a busca por soluções inovadoras, como o emprego de tecnologias baseadas em biotecnologia ou métodos de reutilização do lodo para a produção de fertilizantes orgânicos.

Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece uma estrutura legal para o manejo adequado dos resíduos sólidos no Brasil, incluindo o lodo gerado pelas ETEs.

A PNRS promove a integração entre os entes federativos e incentiva a cooperação entre o setor privado e a sociedade civil. Seu principal objetivo consiste em reduzir e conter as consequências negativas do aumento da geração de resíduos sólidos no país, por meio de estratégias como a reciclagem, o reaproveitamento e a destinação final adequada dos resíduos.

A legislação define princípios, diretrizes e responsabilidades para os diversos agentes envolvidos na gestão de resíduos, assegurando a contribuição de cada parte para uma gestão eficaz e sustentável, com foco na mitigação dos impactos ambientais e na melhoria da qualidade de vida das populações. A PNRS estabelece, ainda, princípios, objetivos, instrumentos e

diretrizes voltadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, atribuindo responsabilidades tanto aos geradores quanto ao poder público, considerando também os aspectos econômicos do processo.

O Novo Marco Legal do Saneamento Básico, instituído pela Lei nº 14.026/2020, representa uma transformação significativa no setor de saneamento no Brasil. Com o objetivo de universalizar os serviços de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário até 2033, essa legislação busca enfrentar os desafios históricos existentes, priorizando a ampliação da cobertura e a melhoria da qualidade dos serviços, principalmente nas regiões mais vulneráveis.

Conforme dados do Instituto Trata Brasil (2020), cerca de 35 milhões de brasileiros ainda não possuem acesso à água tratada, e mais de 100 milhões carecem de acesso adequado ao sistema de esgoto, o que evidencia a gravidade da situação e a urgência por mudanças estruturais.

A promulgação da referida Lei responde ao quadro deficiente de cobertura e à precariedade dos serviços de saneamento no país, buscando superar deficiências estruturais e promover uma gestão mais eficiente, sustentável e inclusiva dos recursos e serviços do setor.

O Novo Marco Legal do Saneamento visa assegurar a universalização do saneamento até 2033, alinhando-se aos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, os quais estabelecem como meta o acesso universal à água e ao saneamento até 2030 (ONU, 2015).

Entre os principais avanços do Novo Marco, destaca-se a introdução de um modelo regulatório que favorece a participação da iniciativa privada, por meio de concessões e parcerias público-privadas (PPPs).

A entrada do setor privado é considerada uma estratégia para viabilizar os investimentos necessários à expansão do saneamento, diante da escassez de recursos públicos. Essa mudança busca aumentar a eficiência na prestação dos serviços, elevar a qualidade e ampliar a cobertura em regiões com infraestrutura precária.

O novo modelo de concessões também estabelece que, a partir de 2020, a universalização dos serviços se torne obrigatória para todos os contratos de concessão, garantindo prioridade às áreas mais carentes.

Outro ponto de destaque é a ampliação das atribuições da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), responsável por editar normas gerais, monitorar a implementação das políticas setoriais e assegurar a qualidade e a continuidade dos serviços prestados.

A ANA tem se mostrado essencial no desenvolvimento de sistemas de regulação e gestão no setor, conforme estudos internos que apontam a necessidade de modernização das normas regulatórias (ANA, 2020).

Adicionalmente, a nova legislação determina que os contratos de concessão sejam realizados por blocos de municípios, agrupando-os em regiões geográficas, com o objetivo de gerar economias de escala e reduzir o custo unitário dos serviços.

Essa abordagem visa estruturar um sistema de gestão mais robusto e eficiente, no qual a colaboração entre diferentes esferas governamentais seja crucial para assegurar a equidade na alocação de recursos e o aprimoramento da infraestrutura de saneamento.

A lei também garante a segurança jurídica necessária para atrair investimentos de longo prazo, prevendo contratos de concessão com duração mínima de 30 anos.

A implementação do Novo Marco enfrenta diversos desafios, notadamente a mobilização dos recursos necessários para expandir a infraestrutura, especialmente em regiões com baixa capacidade financeira e tecnológica.

Estudo realizado pela Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2020) aponta que a limitação de recursos e as dificuldades de acesso ao crédito por parte de municípios de pequeno porte representam entraves significativos à efetivação das metas de universalização. A ampliação da cobertura exige, além de investimentos, melhorias na gestão e na capacitação técnica dos gestores públicos locais.

Outro desafio importante consiste em assegurar que a participação do setor privado não resulte em aumentos excessivos de tarifas ou na exclusão das populações mais vulneráveis.

De acordo com o Tribunal de Contas da União (TCU, 2020), é imprescindível que o marco regulatório possua força suficiente para equilibrar os interesses econômicos das concessionárias com a necessidade de garantir o acesso universal aos serviços, sobretudo em áreas de baixa densidade populacional ou de difícil acesso.

A sustentabilidade também é um elemento central no Novo Marco, que incorpora diretrizes para o tratamento adequado de esgoto e a preservação dos recursos hídricos.

O Comitê Nacional de Saneamento Básico (CNSB, 2021) enfatiza a relevância de políticas públicas que integrem saneamento e proteção ambiental, especialmente diante dos desafios relacionados à escassez hídrica e à poluição dos corpos d'água.

A legislação exige o uso de tecnologias que aumentem a eficiência no tratamento de água e esgoto, promovendo o reuso e a conservação de recursos hídricos, em consonância com as tendências globais de desenvolvimento sustentável.

A inovação tecnológica também desempenha papel fundamental nesse novo cenário. A Lei nº 14.026/2020 prevê a incorporação de tecnologias avançadas, como sistemas de automação e digitalização dos processos de saneamento.

Segundo a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2020), a automação pode elevar significativamente a eficiência operacional e reduzir custos, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade e a confiabilidade dos serviços prestados. Soluções inovadoras, como desinfecção por luz ultravioleta e tratamento de águas residuais por processos biológicos e de filtragem, representam estratégias importantes para atender às necessidades de regiões com limitações estruturais.

A integração de tecnologias de baixo custo, como o reaproveitamento de águas pluviais e o uso de energias renováveis nos sistemas de saneamento, também se apresenta como alternativa viável para promover a sustentabilidade no setor (ABES, 2020).

Ao estabelecer diretrizes claras para a universalização do acesso aos serviços básicos de água e esgoto, o Novo Marco Legal do Saneamento configura-se como um avanço significativo. A Lei nº 14.026/2020 pode ser compreendida como uma resposta aos desafios históricos enfrentados pelo Brasil nesse setor.

No entanto, sua implementação dependerá de uma regulação eficiente, da mobilização de investimentos públicos e privados e da cooperação entre os diversos níveis de governo.

O êxito desse modelo dependerá da capacidade de garantir que os benefícios da universalização do saneamento sejam efetivamente estendidos a toda a população, com respeito aos princípios de sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica.

A perspectiva de um futuro com acesso universal à água e ao esgotamento sanitário no Brasil é promissora, mas requer o enfrentamento dos desafios anteriormente mencionados, bem como a constante busca por aprimoramento dos processos de gestão, regulação e execução.

A cooperação entre governo, setor privado e sociedade civil será determinante para a concretização dos objetivos estabelecidos pelo Novo Marco Legal do Saneamento.

Nesse contexto, o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGRIS) dos municípios de Sorocaba e Votorantim, instituído pelo Projeto de Lei nº 183/2015, assume papel estratégico diante da necessidade de ampliar os serviços de gerenciamento de resíduos sólidos em função da urbanização crescente.

Na maioria dos municípios brasileiros, o aumento da geração de resíduos sólidos urbanos e de resíduos oriundos das atividades econômicas, aliado ao crescimento populacional

e à ausência de planejamento adequado, resulta no descarte diário de milhares de toneladas de resíduos em lixões ou aterros sanitários, reduzindo a vida útil dessas áreas.

Dessa forma, torna-se imperativo buscar alternativas ambiental e economicamente viáveis para o tratamento e a destinação final dos resíduos.

Nos municípios de Sorocaba e Votorantim, o documento de gestão de resíduos sólidos define etapas para o planejamento e a implementação de um sistema integrado de gerenciamento, com base na categoria e classificação dos resíduos.

A presente tese justifica-se pela necessidade de explorar estratégias inovadoras e de longo alcance para a gestão eficaz do lodo de uma ETE localizada no município de Votorantim.

Diante dos desafios enfrentados pelos sistemas de tratamento de esgoto, como o aumento na geração de lodo, sua composição complexa e os impactos ambientais e de saúde pública decorrentes da disposição inadequada, observa-se a necessidade de identificar soluções eficazes e ambientalmente responsáveis.

A proposta deste estudo consistiu na investigação de uma alternativa sustentável para a destinação do lodo, superando a prática predominante da disposição em aterros sanitários na região de Sorocaba. Para tanto, foram realizados ensaios laboratoriais a fim de definir a composição ideal do lodo, utilizando princípios da biotecnologia.

Nesse processo, foram introduzidos microrganismos no lodo com o objetivo de competir com bactérias patogênicas, promovendo sua eliminação em favor das espécies não patogênicas. Assim, o resíduo contaminado pôde ser transformado em insumo para produção de adubo orgânico, apropriado para uso agrícola.

Os resultados desta pesquisa indicam impactos significativos no campo do saneamento ambiental, especialmente no que se refere ao tratamento e à gestão do lodo oriundo das Estações de Tratamento de Esgoto.

A investigação de abordagens inovadoras, como a aplicação da biotecnologia para a biorremediação do lodo, apresenta-se como uma solução potencialmente transformadora para um problema que afeta diversas regiões do país, sobretudo em contextos urbanos em expansão.

As diretrizes extraídas desta pesquisa poderão contribuir com formuladores de políticas públicas e profissionais do setor de saneamento, ao fornecer subsídios técnicos para a melhoria dos processos de gestão e tratamento do lodo, com base em soluções que conciliam eficiência técnica e sustentabilidade ambiental.

Além disso, ao proporcionar maior compreensão sobre os mecanismos biológicos envolvidos no tratamento do lodo, este estudo amplia o conhecimento sobre as interações entre

tratamento de esgoto, gestão de resíduos e preservação ambiental. Tal avanço é essencial para o aprimoramento da gestão integrada de resíduos, considerando os riscos ambientais e de saúde pública decorrentes da disposição inadequada de lodo.

A pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, com destaque para a promoção da saúde e bem-estar (ODS 3), a garantia de água potável e saneamento (ODS 6) e a implementação de práticas sustentáveis de produção e consumo (ODS 12), ao promover a recuperação e reutilização do lodo de ETEs de forma econômica e eficiente.

A introdução de métodos de biorremediação, como o uso de microrganismos no tratamento de lodo, oferece uma alternativa viável aos métodos convencionais, que frequentemente dependem de tecnologias de alto custo e impactam negativamente o meio ambiente, como a incineração e o descarte em aterros. Essa inovação contribui para a redução da pressão sobre os aterros sanitários e para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, colaborando com a mitigação das mudanças climáticas (ODS 13). Adicionalmente, promove-se a redução de custos operacionais e dos impactos negativos associados à gestão inadequada do lodo.

Ao transformar um resíduo potencialmente perigoso em recurso útil para a agricultura, estabelece-se um ciclo produtivo sustentável, no qual o lodo de ETE se converte em insumo agrícola, materializando os princípios da economia circular.

Por fim, o aumento da eficiência no manejo de resíduos, aliado à incorporação de tecnologias verdes, tem o potencial de melhorar a qualidade de vida da população, proteger os recursos naturais e assegurar um ambiente saudável para as gerações futuras, em consonância com os compromissos da Agenda 2030 das Nações Unidas.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo Geral

Elaborar uma proposta tecnológica para tratamento e destinação do lodo gerado em um sistema de tratamento de esgoto (ETE), localizada no município de Votorantim/SP.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar e caracterizar a ETE de Votorantim;
- Realizar a caracterização do lodo de acordo com os parâmetros físico – químicas e bacteriológicos;
- Avaliar a biotecnologia de biorremediação como alternativa para o tratamento do lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE);
- Verificar e propor o processo de licenciamento da Unidade de Tratamento de Lodo (UTL) e sua destinação, com levantamento das legislações e normas técnicas a serem atendidas;
- Pesquisar e elaborar proposta de mercado para a destinação final do resíduo, como um produto agregado para comercialização ou acordos cooperativos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A presente revisão da literatura realiza uma análise aprofundada das legislações pertinentes ao tema, das metodologias empregadas no tratamento e na destinação do lodo, dos custos inerentes a esses procedimentos, bem como das alternativas tecnológicas atualmente disponíveis no mercado. O estudo tem por objetivo proporcionar uma compreensão abrangente dos aspectos legais, técnicos e econômicos relacionados à gestão do lodo, destacando as soluções mais eficientes e inovadoras no âmbito da área.

2.1. Saneamento Básico

O saneamento básico é constituído por um conjunto de serviços essenciais para a promoção da saúde pública e proteção ambiental. Nesse sentido, destaca-se a importância da coleta e do tratamento de efluentes urbanos, uma vez que a gestão adequada dos efluentes domésticos e industriais previne a contaminação dos recursos hídricos, contribui para a melhoria das condições sanitárias nas áreas urbanas e reduz os riscos de doenças transmitidas pela água. No contexto brasileiro, o setor de saneamento básico enfrenta desafios relevantes, especialmente no que tange à ampliação das infraestruturas de coleta e tratamento de esgoto em regiões com menor cobertura, onde o acesso a esses serviços permanece limitado (PINTO et al., 2019).

2.1.1. Conceitos básicos e saúde pública

Entende-se por saneamento básico o conjunto de serviços e ações destinadas a assegurar o fornecimento de água potável, o tratamento de esgoto, a gestão dos resíduos sólidos e a drenagem das águas pluviais. Essas ações objetivam a proteção da saúde pública, a preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida tanto em áreas urbanas quanto rurais. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o acesso a serviços sanitários adequados é condição imprescindível para a prevenção de doenças transmitidas pela água, tais como cólera, hepatite, diarreias e outras infecções intestinais, além de promover a redução dos custos relacionados à saúde e a melhoria das condições de vida (WHO, 2018).

No que se refere à coleta e tratamento de efluentes urbanos, estes constituem componentes fundamentais do saneamento básico, voltados à gestão dos resíduos líquidos

provenientes das áreas urbanas. O esgoto doméstico é composto pelas águas residuais oriundas das atividades cotidianas, como o uso de banheiros, cozinhas, lavanderias e chuveiros. A ausência de tratamento adequado desses efluentes pode ocasionar impactos significativos à saúde pública, por meio da ocorrência de surtos de doenças infecciosas e da contaminação dos corpos hídricos, comprometendo, dessa forma, a qualidade da água destinada ao consumo humano (GÓMEZ et al., 2018).

2.1.2. Tipos de tratamentos de efluentes

O tratamento de efluentes é fundamental para a redução da carga poluente das águas residuais, possibilitando seu descarte seguro no meio ambiente ou sua reutilização. Esse processo divide-se em três etapas principais:

- Tratamento primário: Tem como objetivo a remoção dos sólidos maiores e das partículas suspensas presentes no esgoto por meio de processos físicos, como sedimentação e filtração. Essa fase é essencial para a redução da carga orgânica, tornando o tratamento subsequente mais eficiente na remoção dos contaminantes remanescentes (METCALF; EDDY, 2014).

- Tratamento secundário: Envolve processos biológicos que utilizam microrganismos para decompor a matéria orgânica contida no esgoto. Dentre as técnicas mais empregadas destacam-se os reatores de lodo ativado, que promovem a aeração do esgoto, permitindo a decomposição dos poluentes por bactérias, e as lagoas de estabilização, que utilizam organismos aquáticos para a biodegradação dos resíduos. Esta etapa é responsável pela remoção da maior parte da matéria orgânica, embora não elimine todos os poluentes (METCALF; EDDY, 2014).

- Tratamento terciário: Constitui a fase final do tratamento de esgoto, voltada à remoção de poluentes específicos, tais como nutrientes (nitrogênio e fósforo), substâncias tóxicas e patógenos. Esse processo torna o esgoto tratado adequado para o lançamento em corpos hídricos ou para reutilização. Técnicas como filtração avançada, adsorção em carvão ativado e desinfecção (por cloração ou radiação ultravioleta) são empregadas nesta etapa para assegurar o cumprimento dos padrões ambientais e de saúde pública (GÓMEZ et al., 2018).

A conjugação dessas etapas garante o tratamento eficaz dos efluentes domésticos e industriais, minimizando os impactos ambientais e os riscos à saúde pública.

2.1.3. Legislações aplicadas na área do saneamento básico

Com o contínuo crescimento industrial e urbano no Brasil, os sistemas de tratamento de esgoto passaram a enfrentar desafios significativos relacionados à geração de lodo, à complexidade de sua composição e aos impactos ambientais e à saúde pública advindos de sua disposição inadequada.

Tais circunstâncias evidenciam a necessidade urgente de desenvolvimento e aplicação de soluções eficazes e ambientalmente sustentáveis.

No que tange à gestão de resíduos sólidos, destaca-se como marco regulatório a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Todavia, legislações anteriores já demonstravam preocupação com a temática dos resíduos sólidos.

A Política Nacional do Meio Ambiente, promulgada pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, representou um avanço na legislação ambiental brasileira ao estabelecer os princípios gerais da proteção ambiental.

Contudo, foi apenas com a promulgação da Constituição Federal de 1988 que os resíduos sólidos passaram a ter maior relevância normativa, sendo atribuída aos municípios a responsabilidade pela gestão dos serviços de limpeza urbana.

A Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, foi elaborada com o objetivo de disciplinar a destinação adequada de resíduos e embalagens de agrotóxicos e produtos similares, tendo seu artigo 3º, §6º, estabelecido medidas para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública.

No ano de 1993, duas legislações merecem destaque: o Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993, que tratou da adesão do Brasil à Convenção da Basileia, a qual regula o controle de movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e sua eliminação, e a Resolução nº 05, de 5 de agosto de 1993, que disciplinou o gerenciamento de resíduos sólidos gerados em portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários, além de estabelecimentos prestadores de serviços de saúde.

Essa última resolução, em seu Anexo I, classificou os resíduos sólidos em quatro grupos distintos, com base nos riscos que apresentam ao meio ambiente e à saúde pública, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos Resíduos Sólidos segundo a Resolução nº 05/1993 e Resolução
CONAMA nº 23/1996

Grupo / Classe	Descrição
Grupo A	Resíduos com risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de agentes biológicos. Incluem: excreções, secreções e líquidos orgânicos; meios de cultura; tecidos, órgãos, fetos e peças anatômicas; filtros de gases de áreas contaminadas; resíduos de áreas de isolamento; restos alimentares de unidades de isolamento; resíduos de laboratórios de análises clínicas; resíduos de unidades ambulatoriais; resíduos de sanitários hospitalares e de enfermarias; animais mortos em meios de transporte; objetos perfurantes ou cortantes como lâminas de barbear, bisturis, agulhas, escalpes, vidros quebrados, entre outros provenientes de serviços de saúde.
Grupo B	Resíduos com risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido às suas características químicas. Compreendem: drogas quimioterápicas e materiais contaminados por elas; resíduos farmacêuticos; demais produtos considerados perigosos, tais como os tóxicos, corrosivos, inflamáveis e reativos.
Grupo C	Rejeitos radiativos. Incluem materiais radioativos ou contaminados com radionuclídeos, originários de laboratórios de análises clínicas, serviços de medicina nuclear e radioterapia.
Grupo D	Resíduos comuns não classificados nos grupos anteriores. <i>Classe I Resíduos perigosos, conforme definido pela Resolução CONAMA nº 23/1996.</i> <i>Classe II Resíduos não inertes.</i> <i>Classe III Resíduos inertes.</i>
Outros Resíduos	Categoria adicional para resíduos não abrangidos pelas classes anteriores.

Fonte: Adaptado de Brasil (1993); CONAMA (1996).

No ano de 1998, a Resolução CONAMA nº 235 promoveu alterações nas informações relativas à classificação das diferentes categorias de resíduos. Ainda nesse mesmo ano, foi sancionada a Lei nº 9.605, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, a qual estabeleceu penalidades administrativas e sanções para condutas consideradas lesivas ao meio ambiente, incluindo o manuseio inadequado de resíduos, conforme previsto em sua Seção III.

Posteriormente, a Política Nacional de Educação Ambiental foi instituída pela Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999, definindo os princípios e as diretrizes que orientam a educação ambiental e a participação da sociedade na preservação dos recursos naturais.

Os Decretos nº 4.074 e nº 4.281, ambos de 2002, foram editados com o propósito de regulamentar, respectivamente, as Leis nº 7.802/1989 e nº 9.795/1999. Tais decretos exerceram um papel fundamental ao estabelecer diretrizes e parâmetros voltados à segurança ambiental, abordando questões relacionadas ao uso de produtos químicos e à proteção do meio ambiente. Em 2001, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) editou a Resolução nº 275, que normatizou a identificação por cores para a separação, o armazenamento e o transporte dos diferentes tipos de resíduos sólidos, visando à padronização e à eficiência nos processos de gestão ambiental, conforme Quadra 2.

Quadro 2– Cores padronizadas para separação, armazenamento e transporte de resíduos,

segundo a Resolução CONAMA nº 275/2001

Cor	Tipo de Resíduo
Azul	Papel/Papelão
Vermelho	Plástico
Verde	Vidro
Amarelo	Metal
Preto	Madeira
Laranja	Resíduos perigosos
Branco	Resíduos ambulatoriais e de serviços de saúde
Roxo	Resíduos radiativos
Marrom	Resíduos orgânicos
Cinza	Resíduo geral não reciclável, misturado ou contaminado não separável

Fonte: Adaptado de CONAMA (2001).

2.1.3.1. Conama

No ano de 2002, o CONAMA desempenhou papel ativo ao publicar quatro resoluções de grande relevância. A Resolução CONAMA nº 307 estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos voltados para a gestão eficiente dos resíduos provenientes da construção civil. Por sua vez, a Resolução nº 308 abordou o licenciamento ambiental associado à disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte, buscando mitigar os possíveis riscos e impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado, bem como assegurar a adoção de medidas de proteção ambiental.

A Resolução CONAMA nº 313 teve papel crucial ao regulamentar o inventário de resíduos sólidos industriais e incentivar a busca por soluções relacionadas à redução, reciclagem e tratamento adequado desses resíduos. Ademais, a Resolução CONAMA nº 316 estabeleceu procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, com o objetivo de garantir que tais sistemas operem de forma segura e ambientalmente responsável, evitando emissões poluentes e riscos à saúde pública.

No ano de 2004, foram promulgados decretos que evidenciaram a preocupação com produtos químicos perigosos e poluentes orgânicos persistentes. O Decreto nº 5.098 e o Decreto Legislativo nº 204 demonstraram crescente atenção às questões relacionadas à segurança química e à preservação ambiental. Inserida neste contexto, a Convenção de Roterdã, motivada pela preocupação com os impactos adversos à saúde humana e ao meio ambiente causados por substâncias químicas e agrotóxicos perigosos no âmbito do comércio internacional, estabeleceu procedimentos por meio do Decreto nº 5.360, de 2005. Essa convenção teve como objetivo

promover o controle e a disseminação de informações sobre essas substâncias, buscando reduzir os riscos associados ao seu manuseio e uso inadequado.

Em 2006, o CONAMA definiu critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto, por meio das Resoluções nº 375 e nº 380. Essas resoluções foram elaboradas em resposta à necessidade de regulamentar a utilização de lodos, visando garantir que essa prática ocorra de forma segura, sem comprometer a qualidade do solo e dos recursos hídricos.

2.1.3.2. Lei do saneamento básico

O ano de 2007 foi marcado por um avanço significativo na legislação ambiental brasileira. A Lei nº 11.445, de 5 de janeiro, conhecida como Lei do Saneamento Básico, estabeleceu um arcabouço normativo para o setor de saneamento básico. Essa lei definiu, de forma abrangente, o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais relacionados à água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana, gerenciamento de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais. Esse marco regulatório representou um passo importante para a promoção de melhorias na qualidade de vida das comunidades e para a preservação do meio ambiente.

No ano seguinte, 2008, ocorreu um aprimoramento na legislação ambiental referente às infrações e sanções administrativas. Por meio da Lei nº 6.514, de 2008, foram estabelecidas normas para a fiscalização, autuação e aplicação de sanções, com o objetivo de fortalecer o sistema de fiscalização ambiental e garantir a efetividade das medidas punitivas.

2.1.3.3. Política nacional de resíduos sólidos

Um marco transformador ocorreu em 2010 com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que, por meio do artigo 19, estabeleceu o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), definindo sua obrigatoriedade para estabelecimentos que atuam com: resíduos dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos de serviços de saúde e resíduos de construção civil.

A PNRS abrange não somente as responsabilidades dos geradores e do poder público, mas também aborda os resíduos perigosos, instrumentos econômicos e proibições relacionadas. Sua regulamentação foi realizada pelo Decreto nº 7.404, de 2010, que instituiu o Comitê Interministerial da PNRS e o Comitê Orientador para a implementação dos Sistemas de

Logística Reversa. No mesmo ano, foi promulgado o Decreto nº 7.405, que instituiu o programa Pró-Catador, estabelecendo sua organização e funcionamento.

Esse contexto legislativo apresenta uma cronologia das normas relacionadas ao tema. Destaca-se ainda a Norma Brasileira (NBR) 10004:2004, responsável pela classificação dos resíduos sólidos, categorizando-os conforme características como inflamabilidade, corrosividade e patogenicidade, entre outras.

Por fim, é importante salientar que, no âmbito dos resíduos correlatos ao saneamento básico, houve avanço com a promulgação, em 2020, do novo Marco Legal, instituído pela Lei nº 14.026. Essa legislação tem como objetivo a universalização dos serviços até 31 de dezembro de 2033, comprometendo-se a garantir o acesso a água potável para 99% da população e a cobertura de coleta e tratamento de esgoto para 90% da população.

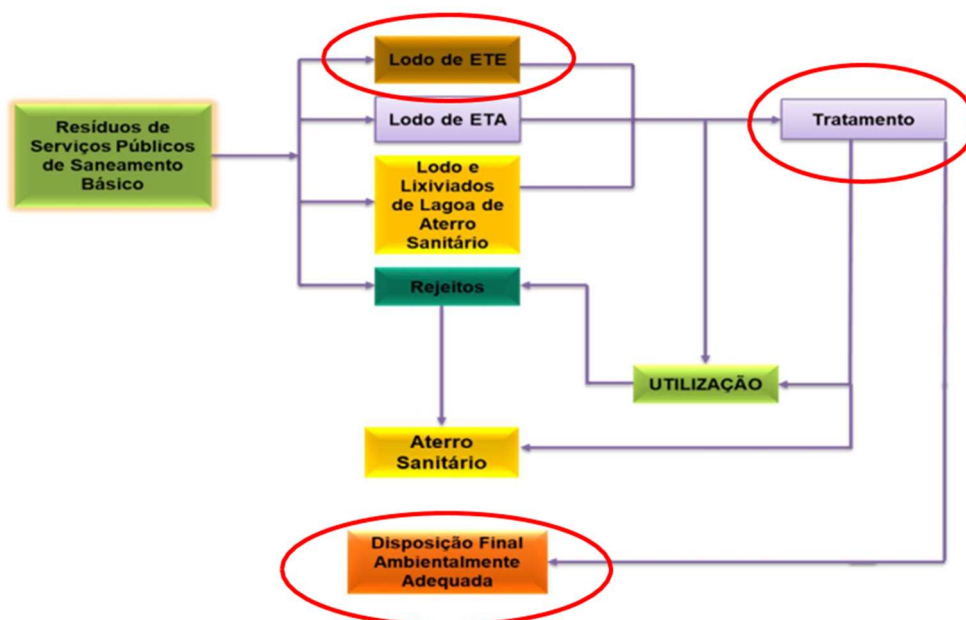
2.1.3.4. Planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos

As abordagens metodológicas adotadas na elaboração dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) dos municípios de Sorocaba e Votorantim basearam-se em um levantamento abrangente das práticas administrativas locais relacionadas à gestão de resíduos sólidos. Esses planos contemplaram de forma detalhada as sete palavras chaves envolvidas nessa gestão como geração, segregação na origem, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos.

Além disso, a classificação dos resíduos foi orientada pelo princípio da responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos, com ênfase na aplicação da logística reversa. Nessa perspectiva, resíduos como pilhas, baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas de diferentes categorias e itens similares são direcionados para devolução às respectivas entidades responsáveis por sua fabricação, importação, distribuição ou comercialização, não devendo, portanto, alcançar os aterros sanitários.

Em relação aos resíduos gerados pelos serviços públicos de saneamento básico, todas as etapas de sua geração estão representadas de forma ilustrativa e elucidativa na Figura 1. O Diagrama de Blocos proporciona uma visualização clara das estratégias de gestão dos Resíduos de Serviços Públicos de Saneamento Básico, conforme proposto por Schalch (2014), abrangendo todas as fases do processo. A etapa de destaque, representada na cor vermelha, refere-se ao resíduo selecionado para estudo, o lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), bem como às etapas específicas de interesse para a proposta atual.

Figura 1 - Diagrama de Blocos com as estratégias para o resíduo de serviços públicos de saneamento básico



Fonte: SCHALCH, 2014, adaptado pelo autor, 2023.

2.2. Técnica da biorremediação

A biorremediação é uma técnica ambiental que utiliza organismos vivos, como microrganismos, plantas, algas ou fungos, para eliminar, decompor ou neutralizar poluentes presentes em ambientes contaminados.

Essa abordagem tem se consolidado como uma alternativa cada vez mais popular e sustentável em relação aos métodos tradicionais de remediação, como os processos físicos e químicos, os quais frequentemente geram resíduos indesejados e apresentam custos elevados (Vidali, 2001).

Essa técnica tem sido aplicada com êxito em diversos tipos de contaminação ambiental, incluindo derramamentos de óleo, poluição por metais pesados e resíduos industriais. Um exemplo clássico de sua aplicação é o uso de microrganismos para degradar hidrocarbonetos em locais afetados por vazamentos de petróleo, nos quais bactérias especializadas transformam o petróleo em compostos mais simples e menos nocivos (ATLAS & BARTHA, 1992).

Em áreas urbanas e industriais, a biorremediação também vem sendo empregada na recuperação de solos contaminados por solventes orgânicos, como derivados de pesticidas ou de produtos industriais. Nesse contexto, são adicionados microrganismos ou nutrientes específicos que estimulam a atividade biológica e facilitam a degradação dos poluentes (REDDY et al., 2006).

Apesar de ser uma alternativa promissora, a biorremediação apresenta desafios e limitações. A eficiência do processo depende de variáveis ambientais que podem ser difíceis de controlar, como temperatura, pH, oxigênio disponível e umidade. Além disso, a presença de contaminantes em concentrações muito elevadas ou de compostos resistentes à degradação biológica pode comprometer a eficácia dos organismos utilizados (SCHNOOR, 1997).

Em determinadas situações, o processo pode demandar longos períodos para alcançar resultados satisfatórios, o que representa um obstáculo quando se busca uma remediação rápida.

O monitoramento constante é essencial para assegurar que a biorremediação ocorra de maneira eficiente e segura, evitando a liberação de subprodutos tóxicos e prevenindo desequilíbrios ecológicos no ambiente tratado (MENDEZ & MAIER, 2008).

2.2.1. As principais técnicas e organismos utilizados

A biorremediação fundamenta-se na capacidade de determinados organismos vivos de metabolizar substâncias contaminantes, convertendo-as em compostos menos tóxicos ou até inofensivos para o meio ambiente. Esse processo pode envolver a degradação de compostos orgânicos complexos, como hidrocarbonetos, solventes e pesticidas, bem como a remoção de metais pesados e outros contaminantes inorgânicos (GIBSON et al., 2010). A técnica pode ser aplicada em diferentes matrizes ambientais, incluindo solos, águas, sedimentos e até no tratamento de ar contaminado (FENG et al., 2011).

Diversos processos complementares contribuem para a biorremediação, como a biotransformação — na qual poluentes são quimicamente alterados por enzimas produzidas por organismos vivos — e a bioacumulação, que ocorre quando certos organismos acumulam contaminantes, como metais pesados, em seus tecidos, promovendo sua remoção do ambiente (SCHNOOR, 1997).

Entre as técnicas de biorremediação, destaca-se a fitorremediação, uma abordagem promissora que utiliza plantas para remover, estabilizar ou neutralizar contaminantes presentes no solo ou na água. As plantas, por meio de suas raízes, podem absorver poluentes ou

transformá-los em compostos menos nocivos por meio de processos bioquímicos realizados em seus tecidos. A fitorremediação tem demonstrado eficácia no tratamento de metais pesados, como cádmio, chumbo e mercúrio, além de compostos orgânicos como hidrocarbonetos (SALT et al., 1998).

A biorremediação pode ser classificada em duas categorias principais: *in situ* e *ex situ*, conforme o local de aplicação do processo. A modalidade *in situ* é realizada diretamente no local da contaminação, sem a necessidade de remoção do material contaminado. Essa abordagem apresenta vantagens como a redução de custos e menor impacto ambiental, já que elimina o transporte de solo ou água contaminados. Além disso, tende a ser mais rápida, uma vez que o tratamento ocorre no próprio ambiente afetado (VIDALI, 2001).

Contudo, sua eficácia depende fortemente das condições ambientais, como disponibilidade de nutrientes, oxigênio, temperatura e pH (MENDEZ & MAIER, 2008).

Por outro lado, a biorremediação *ex situ* envolve a remoção do material contaminado, que é então transportado para instalações especializadas onde o tratamento ocorre fora do local original. Essa abordagem é indicada para casos de contaminação mais severa ou em situações nas quais o tratamento local não é viável. Apesar dos custos mais elevados, a biorremediação *ex situ* oferece maior controle sobre as condições ambientais, o que pode resultar em maior eficiência do processo (GÓMEZ et al., 2020).

Os microrganismos desempenham papel essencial na biorremediação, graças à sua diversidade metabólica, que os torna capazes de degradar uma ampla variedade de poluentes. Entre as bactérias mais utilizadas na biorremediação de hidrocarbonetos, destacam-se *Pseudomonas putida* e *Alcanivorax borkumensis*, que metabolizam compostos complexos presentes no petróleo e seus derivados (DAS & CHANDRAN, 2011).

Além das bactérias, fungos como *Phanerochaete chrysosporium* e *Trametes versicolor* também se mostram eficazes na decomposição de substâncias tóxicas, incluindo solventes industriais e produtos petroquímicos (GADD, 2000).

Em áreas contaminadas por metais pesados, como solos agrícolas ou regiões industriais, a fitorremediação tem se mostrado uma solução eficiente para a remoção desses poluentes. Plantas como *Brassica juncea* e *Helianthus annuus* são capazes de acumular grandes quantidades de metais pesados, como cádmio e chumbo, em seus tecidos, facilitando sua extração e posterior recuperação (SALT et al., 1998).

2.3. Uso e destinação do lodo de ETE

O lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) constitui um subproduto do processo de purificação de águas residuais, sendo composto por uma mistura de sólidos orgânicos e inorgânicos. Esse material é formado durante as etapas de tratamento físico-químico e biológico dos efluentes e contém uma diversidade de substâncias, que vão desde matéria orgânica até metais pesados (SANTOS, 2018).

A composição do lodo varia conforme o tipo de tratamento adotado e a origem dos efluentes. A análise e caracterização desse resíduo são etapas fundamentais para a definição da forma mais adequada de destinação e dos tratamentos necessários, assegurando sua segurança e viabilidade para diferentes usos.

Uma gestão eficiente do lodo é essencial não apenas para o cumprimento das regulamentações ambientais, mas também para a promoção de práticas sustentáveis e a prevenção de impactos negativos ao meio ambiente.

A destinação inadequada pode ocasionar contaminação do solo e da água. Diversas alternativas de manejo e reaproveitamento do lodo têm sido exploradas, com destaque para seu uso como fertilizante agrícola, na compostagem, como agregado para cerâmica ou como combustível para alto-forno, sempre considerando os aspectos ambientais e tecnológicos envolvidos.

A gestão adequada do lodo proveniente de ETEs é indispensável para a preservação ambiental e a proteção da saúde pública. A compostagem e a aplicação agrícola se apresentam como opções viáveis, desde que haja um controle rigoroso da qualidade do lodo e uma avaliação criteriosa dos riscos associados à presença de substâncias tóxicas.

Dentre as formas mais comuns de reutilização, destaca-se a aplicação do lodo como fertilizante agrícola, devido ao seu elevado teor de matéria orgânica e nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio.

A compostagem é frequentemente utilizada para aprimorar as características do lodo, promovendo a redução de seu volume e a estabilização dos compostos orgânicos, o que o torna mais seguro para uso agrícola. Essa técnica é considerada viável e de baixo custo, atendendo aos padrões legais e configurando-se como uma alternativa segura para a disposição final do lodo por meio da reciclagem agrícola.

Apesar das vantagens dessa prática, seu uso não está isento de riscos. A presença de metais pesados e patógenos pode resultar na contaminação do solo e da água, representando ameaças à saúde humana e animal. Além disso, embora a incineração do lodo seja eficaz na

redução de seu volume, esse processo pode liberar emissões atmosféricas nocivas (PAREDES FILHO, 2011).

2.3.1. Principais usos de técnicas para tratamento do lodo de ETE

O manejo adequado do lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é fundamental para minimizar os impactos ambientais e aproveitar seus potenciais benefícios. Diversos usos para esse resíduo são descritos na literatura, destacando-se nas áreas da agricultura, geração de energia, construção civil e recuperação ambiental.

Na agricultura, o lodo pode ser utilizado como fertilizante, em razão de seu conteúdo de nutrientes essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio, que contribuem para o desenvolvimento das plantas.

Sua aplicação também pode melhorar a estrutura do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e facilitando a aeração. No entanto, é imprescindível que o uso agrícola do lodo seja cuidadosamente monitorado, a fim de evitar a contaminação do solo e da água por metais pesados, patógenos e outros poluentes (JENSEN et al., 2017).

Além de sua utilização como fertilizante, o lodo de ETE pode ser empregado na produção de biogás, especialmente metano, por meio da digestão anaeróbica. Esse biogás pode ser convertido em energia elétrica ou térmica, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e favorece o uso de fontes renováveis de energia (DEGEN et al., 2018).

A digestão anaeróbica também reduz o volume do lodo e melhora a qualidade do material residual (SANTOS et al., 2021).

O lodo tratado pode ser utilizado na recuperação de solos contaminados, pois promove a adsorção de contaminantes e melhora a estrutura física do solo (ZHAO et al., 2019).

Em técnicas de fitorremediação, ele atua como suplemento nutricional, estimulando o crescimento de plantas que auxiliam na remoção de poluentes (WANG et al., 2020).

Na construção civil, o lodo de ETE pode ser incorporado em materiais como concreto, cerâmica e tijolos, substituindo parcialmente agregados convencionais, como a areia. Esse aproveitamento contribui para a redução dos impactos ambientais e oferece uma alternativa para o destino de um resíduo que, de outra forma, seria descartado em aterros (GÓMEZ et al., 2018; LIMA et al., 2019).

Para essa aplicação, é essencial que o lodo seja adequadamente tratado, de modo a evitar impactos negativos nas propriedades mecânicas dos materiais (SANTOS et al., 2020).

Outro uso promissor é a recuperação de compostos valiosos presentes no lodo, como metais pesados e outros elementos químicos que podem ser extraídos para reutilização, promovendo a economia circular e reduzindo a dependência da mineração (SILVA et al., 2021).

O lodo também pode ser transformado em composto orgânico por meio da compostagem, gerando um material que pode ser utilizado como fertilizante ou melhorador de solo, principalmente em áreas urbanas e jardins. Esse processo reduz o volume do resíduo e elimina patógenos, tornando-o mais seguro para aplicações agrícolas (MÜLLER et al., 2021; LIMA et al., 2020).

Em processos de biorremediação e tratamento de águas residuais, o lodo tratado pode ser utilizado para a degradação de substâncias tóxicas por meio da ação de microrganismos presentes em sua composição, sendo especialmente útil em áreas contaminadas ou degradadas (CAVALCANTE et al., 2020).

No contexto da agricultura, reflorestamento e pecuária, o uso do lodo de ETE apresenta tanto benefícios quanto riscos. Como subproduto do processo de tratamento de esgoto, o lodo é composto por matéria orgânica, nutrientes como nitrogênio e fósforo, metais pesados, microrganismos e substâncias potencialmente tóxicas.

Com o aumento da produção de lodo e as restrições ao seu descarte em aterros, alternativas sustentáveis para seu uso tornaram-se urgentes. Na agricultura, seu uso como fertilizante pode incrementar a matéria orgânica do solo, aumentar sua fertilidade e melhorar as condições físicas e químicas do ambiente de cultivo, favorecendo a produtividade de culturas como milho, soja e trigo (TAVARES et al., 2020; MIELKE et al., 2018; ALMEIDA et al., 2019).

Contudo, é necessário controlar os riscos de contaminação por metais pesados, como chumbo, cádmio, mercúrio e arsênio, que podem se acumular na cadeia alimentar, além da presença de microrganismos patogênicos, que oferecem risco à saúde, especialmente quando o lodo é utilizado em lavouras de alimentos consumidos crus (TELES et al., 2021; GUEDES et al., 2022).

No reflorestamento, a aplicação do lodo pode acelerar a recuperação de áreas degradadas, fornecendo nutrientes e melhorando a estrutura dos solos empobrecidos. Isso contribui para o crescimento de espécies nativas e para a restauração ecológica, ao mesmo tempo em que reduz a necessidade de fertilizantes químicos e o volume de resíduos gerados nas ETEs (SILVA et al., 2020; SANTOS et al., 2021).

Entretanto, é necessário avaliar os impactos sobre a biodiversidade local, pois o uso inadequado pode alterar as propriedades do solo e favorecer espécies invasoras, além de liberar substâncias tóxicas que comprometem a flora e fauna do ecossistema restaurado (MENDONÇA et al., 2022; CARDOSO et al., 2023).

Na pecuária, o lodo de ETE pode ser aplicado em áreas de pastagem, promovendo a fertilização do solo e aumentando a produtividade da forragem, o que beneficia a alimentação do rebanho (BARBOSA et al., 2020).

A incorporação de matéria orgânica ao solo reduz a erosão e melhora a retenção de água, favorecendo o crescimento da vegetação (RAMOS et al., 2021).

No entanto, há riscos de contaminação dos produtos de origem animal, como carne e leite, devido ao acúmulo de metais pesados ou patógenos presentes no solo e na forragem (PEREIRA et al., 2022; GONÇALVES et al., 2021).

A utilização do lodo de ETE nas atividades agrícolas, florestais e pecuárias está sujeita a regulamentações rigorosas. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 375/2006 e a norma ABNT NBR 13.229 estabelecem limites máximos para a presença de metais pesados e patógenos no lodo destinado à reutilização.

Além disso, a adoção de boas práticas de manejo e a realização periódica de análises laboratoriais são essenciais para assegurar que o uso do lodo seja ambientalmente seguro e não represente riscos à saúde humana.

2.4. Licenciamento ambiental para comercialização do lodo

A comercialização do lodo proveniente do tratamento de águas residuais é regida por um conjunto detalhado de normas e legislações cujo objetivo principal é minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública.

Nesse contexto, o licenciamento ambiental desempenha papel central, uma vez que assegura que a atividade seja executada de forma responsável e em conformidade com as regulamentações legais.

Para tanto, é essencial o cumprimento das orientações estabelecidas pelas legislações federais e pelas normas técnicas da ABNT, garantindo não apenas a conformidade legal, mas também a preservação ambiental e a proteção da saúde humana.

A comercialização do lodo de esgoto deve observar as diretrizes da Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), a qual estabelece princípios gerais para a proteção ambiental e regula o processo de licenciamento ambiental.

De acordo com essa lei, todas as atividades que possam causar degradação ambiental, incluindo o manejo e a comercialização de resíduos, requerem licenciamento ambiental, o que assegura que tais práticas sejam conduzidas de forma controlada e segundo os parâmetros definidos pelas autoridades competentes.

Esse processo é disciplinado pela Resolução CONAMA nº 237/1997, que regula o licenciamento de empreendimentos com potencial impacto ambiental, exigindo a elaboração de estudos e análises detalhadas sobre os efeitos ambientais, sociais e econômicos da atividade, além da implementação de medidas corretivas e preventivas.

Paralelamente ao licenciamento, é exigido o cumprimento de normas técnicas específicas que regulamentam o manejo, a destinação e a utilização do lodo de esgoto.

A Resolução CONAMA nº 375/2006, por exemplo, estabelece diretrizes para o uso agrícola do lodo, definindo parâmetros de qualidade e tratamento necessários à sua aplicação segura, com foco na redução de patógenos, metais pesados e compostos tóxicos. Complementarmente, a Norma Brasileira NBR 10.004/2004 classifica os resíduos sólidos, enquanto a NBR 13.033/2017 especifica os requisitos para o uso agrícola do lodo, estabelecendo limites para contaminantes e orientando procedimentos de amostragem e análise, de modo a evitar riscos à saúde e ao meio ambiente.

O processo de licenciamento para a comercialização do lodo envolve etapas formais, iniciadas com a solicitação ao órgão ambiental competente e concluídas com a emissão da licença específica.

Conforme a Resolução CONAMA nº 237/1997, é obrigatória a apresentação de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) ou Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), conforme a complexidade do empreendimento. Esses documentos devem apresentar uma avaliação dos impactos ambientais e propor medidas mitigadoras eficazes.

Além disso, a atividade deve atender à Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e à Resolução CONAMA nº 369/2006, que regulamenta a disposição e o aproveitamento de resíduos.

Esses instrumentos reforçam a prioridade ao reaproveitamento do lodo, desde que sejam respeitados os limites ambientais e os critérios de segurança para a saúde pública.

A responsabilidade pela gestão adequada do lodo comercializado recai sobre o empreendedor, que deve realizar monitoramentos contínuos da qualidade do material, conforme exigido pela Resolução CONAMA nº 375/2006. Tal monitoramento abrange a verificação da

presença de metais pesados, patógenos e outros contaminantes, visando garantir a segurança do produto.

Adicionalmente, o órgão ambiental responsável pelo licenciamento deve realizar fiscalizações periódicas, assegurando que a atividade esteja sendo conduzida de acordo com os requisitos técnicos e legais.

Assim, busca-se garantir que a comercialização do lodo ocorra de forma segura, ambientalmente adequada e socialmente responsável.

2.5. Biorremediação aplicada ao lodo de ETE

O lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETE) apresenta elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio e fósforo, além de substâncias potencialmente tóxicas que, quando não tratados de forma adequada, podem ocasionar sérios danos ambientais (LIMA et al., 2019).

O tratamento desse lodo representa um desafio significativo, especialmente porque as tecnologias tradicionais, como a desidratação térmica realizada por meio de centrífugas, possuem custos elevados devido ao alto consumo energético. Nesse cenário, a biotecnologia surge como uma alternativa mais sustentável.

A aplicação da biotecnologia de biorremediação como método alternativo para o tratamento do lodo oriundo de ETEs tem ganhado relevância nos últimos anos, por se tratar de uma abordagem sustentável e de baixo impacto ambiental. A biorremediação utiliza organismos vivos, como microrganismos, plantas ou enzimas para degradar poluentes presentes no ambiente, configurando-se como uma solução eficaz e economicamente viável em comparação com métodos convencionais, como a incineração ou a disposição em aterros sanitários (GUPTA; CHAND, 2020).

No contexto das estações de tratamento de esgoto, a biorremediação destaca-se como uma alternativa promissora para o tratamento e o manejo do lodo gerado.

Esse processo pode ocorrer por meio de diversos mecanismos, como a biodegradação, a mineralização e a transformação de compostos tóxicos em formas menos prejudiciais. Microrganismos como bactérias, fungos e algas exercem papel fundamental nesse processo, promovendo a quebra de moléculas complexas presentes no lodo e contribuindo para a redução da matéria orgânica e dos contaminantes. Além disso, esses organismos também colaboram na diminuição da concentração de metais pesados e compostos orgânicos tóxicos, como hidrocarbonetos e pesticidas (MA et al., 2021).

2.5.1. Benefícios

Os principais benefícios associados à biorremediação do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE) incluem a possibilidade de reutilização desse material e seu baixo custo em comparação com as tecnologias tradicionais.

Ao empregar processos naturais, como a biodegradabilidade, a biorremediação reduz a necessidade de uso de produtos químicos e de tratamentos com alto consumo energético (CHRISTENSEN et al., 2018).

Tais processos podem ser aplicados de forma contínua e ajustada às condições locais, proporcionando um tratamento eficaz e sustentável.

Outro benefício relevante está na possibilidade de reaproveitamento do lodo tratado, o qual pode ser utilizado como biofertilizante ou em processos de recuperação de nutrientes. A aplicação do lodo como fertilizante representa uma alternativa ambientalmente responsável para o reaproveitamento de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que, de outro modo, seriam perdidos ou causariam impactos ambientais em locais de disposição inadequada (KUMAR et al., 2020).

Apesar dos avanços na aplicação da biorremediação, ainda existem desafios a serem superados para que essa tecnologia seja amplamente adotada. Entre os principais obstáculos estão a adaptação dos microrganismos ao ambiente específico do lodo, a eficácia do processo diante de variações de temperatura, pH e concentração de poluentes, bem como o tempo necessário para a completa degradação dos contaminantes (LIMA et al., 2022).

Além disso, a escolha adequada dos microrganismos a serem empregados depende de uma análise detalhada das características do lodo a ser tratado, o que requer conhecimento técnico aprofundado sobre os mecanismos da biorremediação (MA et al., 2021).

A biotecnologia aplicada à biorremediação configura-se, portanto, como uma alternativa promissora e sustentável para o tratamento do lodo oriundo das ETEs. Por meio da ação de microrganismos, torna-se possível reduzir a carga orgânica e os contaminantes presentes, viabilizando tanto sua destinação adequada quanto seu reaproveitamento.

No entanto, a implementação dessa tecnologia ainda enfrenta barreiras técnicas e operacionais, exigindo investimentos contínuos em pesquisa e a adaptação das soluções tecnológicas às realidades locais.

O avanço nessas áreas poderá consolidar a biorremediação como uma ferramenta estratégica na gestão de resíduos sólidos e líquidos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais ecológicas e economicamente viáveis para o tratamento do lodo.

2.5.2. Tecnologias Atuais

Com o objetivo de aprofundar a compreensão sobre as tecnologias aplicadas ao tratamento de lodo por meio da biorremediação, realizou-se a análise de três estudos científicos relevantes, os quais utilizaram agentes biológicos degradadores como bactérias, fungos, leveduras, enzimas e outros microrganismos para a degradação do resíduo. Os principais resultados dessas pesquisas são apresentados a seguir.

O primeiro estudo analisado avaliou a qualidade microbiológica do lodo tratado, considerando parâmetros bacteriológicos comumente utilizados como indicadores de poluição fecal, tais como coliformes totais, *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus aureus* e bactérias mesófilas totais. As amostras foram submetidas a diferentes escalas piloto: duas plantas de digestão anaeróbica, operando em condições mesofílicas e termofílicas, e uma planta de digestão aeróbia termofílica autotérmica (ATAD). O resíduo analisado era proveniente de uma Estação de Tratamento de Água de Reúso (ETAR) localizada na região de Navarra, na bacia do rio Ebro, na Espanha. Os resultados demonstraram que ambos os tratamentos atenderam aos limites estabelecidos pela legislação europeia para os parâmetros de *E. coli* e *Salmonella* spp., indicando a viabilidade do uso do lodo tratado na agricultura (LOPEZ et al., 2019).

O segundo estudo investigou os efeitos da aplicação conjunta de composto de biorresíduos de qualidade e lodo de esgoto oriundo da sedimentação secundária sobre um agroecossistema mediterrâneo. A pesquisa teve como foco a análise das alterações nas características químicas e biológicas do solo, a fim de verificar a manutenção de sua fertilidade e funcionalidade. A avaliação foi conduzida por meio de mesocosmos experimentais durante seis meses de incubação. Os resultados indicaram que a aplicação do composto de biorresíduos teve efeitos positivos sobre os teores de matéria orgânica e fósforo, além de favorecer a funcionalidade da comunidade microbiana. Em contrapartida, a aplicação isolada do lodo de esgoto não demonstrou benefícios significativos para a comunidade microbiana, tampouco apresentou riscos em relação às concentrações e à toxicidade de elementos potencialmente tóxicos no solo (PICARIELLO et al., 2020).

O terceiro estudo abordou a avaliação da contaminação microbiológica do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento urbano em Portugal. Foram testados dois tipos de compostos: o composto misto urbano (UMTT) e o de digestão anaeróbia (DA).

As amostras foram caracterizadas com base em parâmetros físico-químicos e microbiológicos, especificamente a presença de *Escherichia coli* e *Salmonella* spp. Os ensaios envolveram secagem térmica e tratamentos químicos, com ênfase no uso de resíduos industriais alcalinos (como borras de licor verde – GLD, resíduo de cal, cinzas volantes de carvão e casca de ovo) como alternativas à cal convencional, alinhando-se ao conceito de economia circular. Apenas seis das dezenove amostras analisadas atenderam aos limites legais para ambos os microrganismos.

A secagem térmica a 130 °C foi eficaz na higienização das amostras selecionadas, reduzindo os níveis de *E. coli* abaixo do limite legal, independentemente da umidade inicial ou do grau de contaminação. Notavelmente, o uso de óxido de cálcio (CaO) obtido da casca de ovo demonstrou eliminar completamente *E. coli* em todas as dosagens estudadas (0,05–0,15 g/g base úmida), mesmo à temperatura ambiente. Contudo, essa alternativa não foi suficiente para o cumprimento integral da legislação vigente (SANTOS et al., 2020).

2.6. Proposta de utilização da *Bacillus subtilis*

O *Bacillus subtilis* é uma bactéria com amplo potencial biotecnológico, reconhecida por seus múltiplos benefícios em áreas como a produção de enzimas, o controle biológico de patógenos, o desenvolvimento de biofertilizantes e compostos terapêuticos. Sua adaptabilidade a condições extremas, aliada à segurança no uso e à facilidade de manipulação genética, torna essa espécie uma candidata ideal para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis na biotecnologia. A exploração de suas propriedades continua sendo um campo promissor para o avanço científico e tecnológico.

Classificada como bactéria gram-positiva, *B. subtilis* é amplamente empregada na biotecnologia devido à sua capacidade de produzir uma grande diversidade de enzimas e compostos bioativos. Seu uso se estende desde a geração de substâncias de alto valor comercial até aplicações no controle de doenças em plantas e animais. Uma de suas principais vantagens é a produção eficiente de enzimas extracelulares, como amilases, proteases, lipases e celulases, fundamentais em processos industriais nas indústrias alimentícia, farmacêutica, de detergentes

e têxtil, devido à sua estabilidade em condições extremas de temperatura e pH (HUANG et al., 2015; SINGH et al., 2016).

No controle biológico, *Bacillus subtilis* destaca-se como alternativa sustentável aos pesticidas sintéticos. Essa bactéria tem a capacidade de competir com microrganismos patogênicos e produzir substâncias antimicrobianas, como bacilossinas, que inibem o crescimento de agentes prejudiciais à saúde de plantas e animais (ONGENA & JACQUES, 2008).

Pesquisas indicam sua eficácia no combate a doenças fúngicas e bacterianas, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis (DUFRESNE et al., 2014).

Outra aplicação relevante está no uso como biofertilizante, uma vez que *B. subtilis* consegue fixar nitrogênio, solubilizar fosfatos e aumentar a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (SHARMA et al., 2017).

Essa atuação, combinada com a promoção da resistência vegetal a estresses bióticos e abióticos, configura a bactéria como um eficiente bioestimulante (JAYARAMAN et al., 2017).

Na área farmacêutica, *Bacillus subtilis* é fonte de compostos bioativos com potencial terapêutico. Diversas cepas são capazes de sintetizar substâncias com propriedades antimicrobianas, antioxidantes, antitumorais e anti-inflamatórias, despertando interesse para o desenvolvimento de novos medicamentos e terapias alternativas (GÄNZLE & VERMEULEN, 2016).

Do ponto de vista da segurança, trata-se de uma bactéria não patogênica, amplamente utilizada em ambientes industriais por apresentar baixo risco à saúde humana e animal. Sua facilidade de manipulação genética permite a criação de cepas específicas para a produção de proteínas terapêuticas ou enzimas desejadas, com risco reduzido de contaminação (ZHU et al., 2014).

A substituição de métodos tradicionais de produção industrial e controle químico por processos baseados no uso de *B. subtilis* pode contribuir significativamente para a redução de impactos ambientais. Em comparação com compostos sintéticos e pesticidas químicos, as soluções baseadas nessa bactéria apresentam menor toxicidade e maior compatibilidade com os princípios da sustentabilidade (BOYER & FINLAY, 2016).

No contexto do tratamento de lodo oriundo de estações de tratamento de esgoto (ETE), a aplicação biotecnológica de *Bacillus subtilis* representa uma estratégia promissora. Essa bactéria possui capacidade de degradar compostos orgânicos complexos e reduzir a carga poluente, atuando de forma eficaz na biorremediação. Suas enzimas extracelulares, como

proteases, amilases e lipases, desempenham papel fundamental na quebra de substâncias orgânicas presentes no lodo (JUNG et al., 2016), promovendo a mineralização e convertendo compostos tóxicos em formas menos nocivas ao ambiente (BARROS et al., 2013).

Além disso, *B. subtilis* é capaz de formar biofilmes e aderir a partículas do lodo, o que favorece a criação de microambientes que aumentam a eficiência da degradação de poluentes (MIELICH-SÜSS; LOPEZ, 2015).

Estudos revelam reduções significativas nos níveis de matéria orgânica e na presença de compostos nitrogenados e fósforo, substâncias que, quando mal geridas, contribuem para a eutrofização (RAO et al., 2022).

A produção de biossurfactantes como a surfactina também confere à bactéria a capacidade de dispersar poluentes hidrofóbicos, como óleos e graxas, facilitando sua biodegradação (JUNG et al., 2021).

Dessa forma, o uso de *Bacillus subtilis* no tratamento de lodo de ETEs oferece benefícios como a redução da carga poluente, a biodegradação de compostos tóxicos e a diminuição do volume de resíduos. Trata-se de uma abordagem eficiente, sustentável e economicamente viável para a gestão de resíduos orgânicos em sistemas de saneamento.

2.6.1. Aplicações no âmbito nacional e internacional

No Brasil, o *Bacillus subtilis* tem sido amplamente explorado em aplicações voltadas ao tratamento de lodo de esgoto, com foco na biorremediação de compostos orgânicos e na redução da carga poluente. Entre as iniciativas destacam-se o desenvolvimento de sistemas como biorreatores e biofiltros, que utilizam esse microrganismo para acelerar a decomposição da matéria orgânica presente no lodo oriundo de estações de tratamento de esgoto (ETEs).

A aplicação dessa bactéria contribui para a diminuição do volume de lodo gerado, além de melhorar a qualidade do efluente tratado, resultando em menor custo operacional e maior eficiência no processo (LIMA et al., 2019).

O reaproveitamento do lodo tratado também tem se mostrado uma alternativa viável na agricultura, especialmente com o uso de *Bacillus subtilis* para degradação de contaminantes e melhoria da qualidade do material destinado ao uso como biofertilizante. Essa abordagem tem sido aplicada em projetos focados na redução de nutrientes como nitrogênio e fósforo, com o objetivo de mitigar os riscos de eutrofização dos corpos d'água e promover práticas agrícolas mais sustentáveis (SILVA, 2021).

Em âmbito internacional, o uso de *Bacillus subtilis* é adotado em diversos países nos sistemas de tratamento de águas residuais, principalmente na degradação de poluentes orgânicos como hidrocarbonetos, detergentes e outros contaminantes comuns em efluentes industriais e domésticos. As pesquisas desenvolvidas na China, nos Estados Unidos e na Alemanha demonstram a eficácia desse microrganismo em sistemas de biorremediação e biorreatores aplicados ao tratamento de lodo (GUO et al., 2018; JUNG et al., 2021).

Tais sistemas têm apresentado bons resultados na redução de toxinas, mineralização de compostos orgânicos e recuperação de nutrientes, contribuindo para práticas de saneamento mais eficientes e ambientalmente corretas.

Na China, por exemplo, Guo et al. (2018) investigaram a aplicação de *Bacillus subtilis* na biorremediação de lodo de esgoto, evidenciando sua capacidade de reduzir a carga orgânica e remover poluentes emergentes como fármacos e produtos de cuidado pessoal mesmo sob condições ambientais adversas, como variações de pH e temperatura, típicas dos sistemas de tratamento de águas residuais urbanas.

Na Alemanha, *Bacillus subtilis* tem sido empregado em processos de compostagem de lodo, contribuindo para acelerar a degradação da matéria orgânica e a eliminação de patógenos. Esses estudos indicam que a adição da bactéria resulta na produção de biofertilizantes de alta qualidade, adequados para uso agrícola (LIU et al., 2021).

A aplicação desse microrganismo no tratamento de lodo de esgoto e em biorremediação de águas residuais também vem sendo incorporada a tecnologias emergentes, como biofiltros, biorreatores de membranas (MBR) e sistemas integrados com biochar, ampliando o potencial de uso do *Bacillus subtilis* em soluções sustentáveis para o saneamento ambiental.

2.7. Adensamento de lodo de ETE

O adensamento do lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) representa uma etapa essencial no processo de tratamento de águas residuais, com o objetivo de reduzir o volume de lodo gerado e facilitar seu manuseio antes das fases subsequentes, como a desidratação e a destinação final (VON SPERLING, 2005).

Para aprimorar essa etapa, emprega-se uma variedade de polímeros, que atuam na melhoria da eficiência do adensamento. Esses compostos auxiliam na aglomeração das partículas sólidas presentes no lodo, promovendo sua separação e remoção de forma mais eficaz (TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

Os polímeros aplicados nesse processo são, em sua maioria, floculantes, cuja principal função é formar flocos maiores e mais coesos a partir das partículas sólidas dispersas no lodo (METCALF & EDDY, 2016).

Atuando como agentes floculantes, esses produtos promovem a união das partículas finas, facilitando sua sedimentação no fundo do tanque de adensamento e, conseqüentemente, reduzindo o volume de lodo. Esse mecanismo torna o processo de separação sólido-líquido mais eficiente (ANDREOLI et al., 2009).

Além de melhorar a eficiência da sedimentação, os polímeros contribuem para o desempenho das etapas seguintes do tratamento.

A formação de flocos mais densos e coesos favorece o transporte e o processamento do lodo em procedimentos como a desidratação, compostagem ou digestão anaeróbica (VON SPERLING, 2014).

Na unidade analisada, a desidratação é realizada por meio de uma centrífuga. Os polímeros floculantes utilizados no adensamento do lodo podem ser classificados com base em sua composição química e carga iônica.

Os principais tipos incluem:

- Polímeros catiônicos: Apresentam carga positiva e são mais eficazes na floculação de lodos com carga negativa, como os provenientes de esgoto doméstico. São amplamente utilizados em ETEs voltadas ao tratamento de resíduos orgânicos (TCHOBANOGLOUS et al., 2014).

- Polímeros aniônicos: Possuem carga negativa e são indicados para lodos com predominância de carga positiva, como aqueles oriundos de processos industriais que envolvem metais pesados. Oferecem floculação rápida e eficiente (METCALF & EDDY, 2016).

- Polímeros não iônicos: Com carga neutra, são empregados em condições menos agressivas ou quando a eficiência de floculação depende de fatores como viscosidade e concentração de sólidos (ANDREOLI et al., 2009).

No caso em questão, o polímero utilizado é o catiônico, adequado ao perfil de uma estação de tratamento de esgoto doméstico. O processo de aplicação do polímero catiônico no adensamento do lodo, na unidade estudada, compreende as seguintes etapas:

- Pré-dissolução do polímero: O polímero em pó é diluído em água para formar uma solução de baixa concentração. A adição é realizada gradualmente e de maneira controlada, a fim de evitar a formação de grumos e garantir uma mistura homogênea (VON SPERLING, 2005).
- Dosagem controlada: A quantidade de polímero aplicada é calculada com base na carga de lodo a ser tratada. Essa dosagem é realizada por meio de sistemas automatizados, visando a otimização do processo (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).
- Mistura e floculação: Após a adição do polímero, o lodo é submetido a uma agitação inicial vigorosa para assegurar a distribuição uniforme do produto. Em seguida, aplica-se uma agitação mais suave, permitindo a formação e o agrupamento dos flocos (ANDREOLI et al., 2009).
- Sedimentação: Concluída a floculação, o lodo permanece em repouso para que os flocos sedimentem no fundo do tanque. O lodo adensado é então removido e direcionado à centrífuga para a etapa de desidratação (METCALF & EDDY, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi estruturado em diversas etapas, abrangendo a coleta, análise e aplicação do lodo proveniente de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Para a avaliação dos materiais e métodos utilizados, foram descritas as técnicas empregadas na análise de caracterização do lodo, o processo de cultivo do *Bacillus subtilis*, bem como a avaliação da aplicação da biotecnologia por meio do tratamento com biorremediação. Também foram abordados o processo de licenciamento da unidade de tratamento e a análise do mercado regional para a aplicação do fertilizante gerado.

3.1. Identificação e caracterização do lodo de ETE

A coleta do resíduo, especificamente do lodo gerado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) A, foi realizada diretamente da caçamba de armazenamento localizada na unidade operacional. Esse procedimento seguiu os critérios estabelecidos pela norma técnica NBR 10007:2004, que trata da amostragem de resíduos sólidos, garantindo a representatividade e a integridade da amostra para as análises subsequentes. A Figura 2 ilustra o local e o método de coleta adotado.

Figura 2 - Procedimento de coleta do lodo sendo em A a coleta de lodo realizada no ponto de descarte (armazenamento) na caçamba in loco na unidade; B as alíquotas de lodo sendo armazenadas nos recipientes para análise



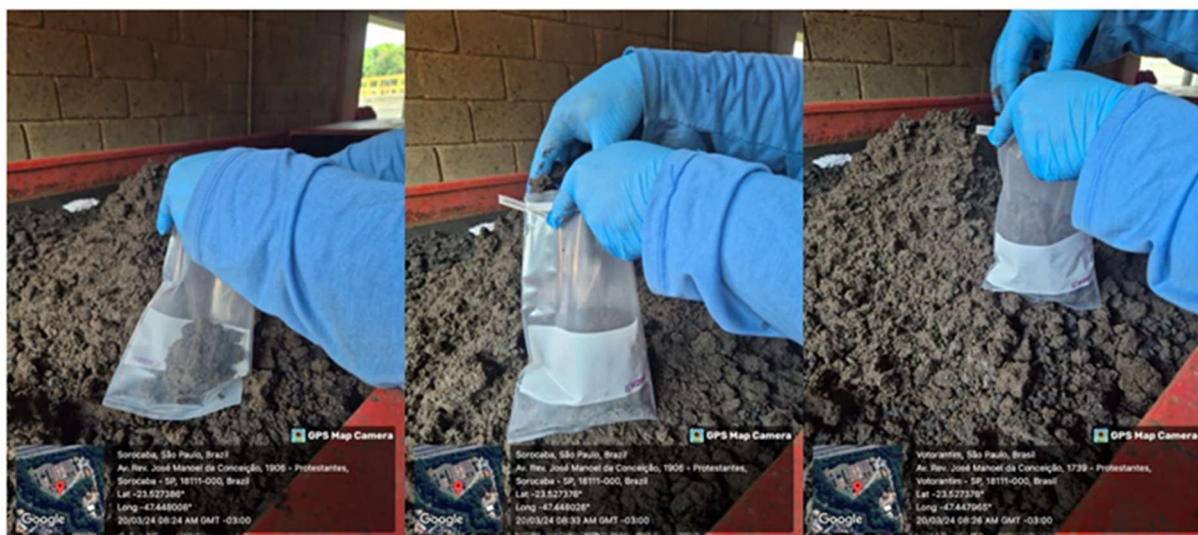
Fonte: Autor, 2024.

Para a execução do procedimento de coleta, foram utilizados recipientes apropriados, incluindo sacos plásticos resistentes e potes de vidro esterilizados, de forma a garantir a integridade da amostra e evitar contaminações externas.

A quantificação exata das alíquotas extraídas foi realizada com base na homogeneidade do lodo, assegurando a representatividade do material coletado para as análises subsequentes.

Na etapa inicial, foi coletada uma massa aproximada de 7,5 kg de lodo da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) A, no dia 20 de março de 2024, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Coleta inicial de lodo da ETE A em 20.03.2024



Fonte: Autor, 2024.

O material coletado foi encaminhado para dois destinos distintos: um laboratório terceirizado, responsável pela caracterização físico-química e microbiológica do lodo, e o laboratório da Universidade de Sorocaba (UNISO), onde foram realizados os testes preliminares relacionados ao uso biotecnológico do resíduo.

As etapas do processo estão documentadas nas imagens apresentadas no ANEXO A.

3.2. Avaliação das características físico – químicas e bacteriológicas do lodo e sua caracterização

A caracterização físico-química dos parâmetros do lodo, tais como percentual de massa sólida, carbono orgânico total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrato (N), nitrito (N), pH, sólidos voláteis e sólidos totais, foi conduzida com base nas metodologias estabelecidas pelas Normas Brasileiras (NBR).

Especificamente, seguiram-se os procedimentos descritos nas normas NBR 10005:2004 e NBR 10006:2024. A NBR 10005:2004 estabelece o método para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos, enquanto a NBR 10006:2024 define os procedimentos para a obtenção do extrato solubilizado. A adoção dessas normas assegura a padronização e a confiabilidade dos resultados obtidos nas análises.

Para a detecção e quantificação de metais, como arsênio total, bário total, cádmio total, chumbo total, cobre total, cromo total, mercúrio total, molibdênio total, níquel total, selênio total, zinco total, fósforo total, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total e magnésio total, foi adotado o Método EPA 6020B (SW-846).

Esse método, baseado em espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), oferece elevada sensibilidade e especificidade, permitindo a detecção precisa e a quantificação exata desses elementos em matrizes complexas, como o lodo de ETE.

As análises microbiológicas, por sua vez, contemplaram a identificação de organismos patogênicos como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp., além de ovos e larvas viáveis de helmintos.

Para essas análises, foi utilizado o método de centrifugação, considerado eficaz na separação e concentração dos microrganismos presentes, permitindo a realização de uma triagem microbiológica confiável e compatível com os critérios sanitários exigidos.

Em relação à análise de poluentes orgânicos e agrotóxicos, aplicou-se o Método EPA 3510C, que utiliza a técnica de extração líquido-líquido com funil separatório. Essa metodologia é amplamente empregada na detecção de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis em resíduos sólidos e líquidos, sendo considerada uma técnica consolidada para a avaliação da presença de contaminantes químicos, incluindo agrotóxicos.

Para a determinação da umidade nas amostras, foi aplicada a NBR 6457:2015, que descreve o procedimento gravimétrico para a determinação da umidade em resíduos sólidos, assegurando precisão e reprodutibilidade nos resultados obtidos.

A adoção dessas metodologias analíticas permitiu a obtenção de dados confiáveis e tecnicamente consistentes, os quais foram essenciais para a avaliação do potencial do lodo tratado.

Com base nesses resultados, foi possível orientar a escolha da biorremediação como alternativa biotecnológica viável para o tratamento do lodo gerado pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), reforçando seu potencial de reaproveitamento com segurança ambiental e técnica.

3.2.1. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos

O procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos seguiu a NBR 10005:2004, que tem como objetivo simular condições ambientais capazes de promover a liberação de substâncias potencialmente contaminantes dos resíduos para o meio ambiente, como água ou solo.

A execução do processo envolveu duas etapas principais:

- Etapa de Extração: O resíduo foi colocado em contato com solução de lixiviação preparada com água destilada, promovendo a dissolução das substâncias solúveis presentes.
- Etapa de Filtração: O líquido resultante da extração, denominado lixiviado, foi submetido à filtração para separação das partículas sólidas, sendo então analisado para quantificação dos compostos dissolvidos.

Essa metodologia foi essencial para avaliar a mobilidade de substâncias contaminantes como metais pesados e compostos orgânicos presentes nos resíduos sólidos.

3.2.2. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos

A obtenção do extrato solubilizado seguiu a NBR 10006:2024, que visa identificar substâncias que podem ser extraídas com solventes orgânicos ou aquosos.

Diferente da lixiviação, este procedimento busca solubilizar compostos que não são facilmente dissolvidos apenas em água.

- Etapa de Preparação do Extrato: O resíduo foi imerso em solução aquosa ou orgânica apropriada.
- Etapa de Análise do Extrato: O líquido obtido foi analisado para identificação e quantificação dos compostos presentes.

Este método permitiu a determinação de substâncias orgânicas de baixa solubilidade em água.

3.2.3. Espectrometria de massa acoplada à espectrometria de absorção atômica

A análise de metais totais foi realizada segundo o Método EPA 6020B (SW-846), que emprega a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), combinada à absorção atômica.

- Etapa de Preparação da Amostra: As amostras foram digeridas com ácidos nítrico e clorídrico para solubilização dos metais.
- Etapa de Análise: As amostras digeridas foram analisadas por ICP-MS, quantificando-se os metais por meio da absorção de radiação emitida pelos elementos.
- Etapa de Quantificação: A concentração dos metais foi determinada com base na intensidade do sinal espectrométrico.

Esse método permitiu a detecção precisa de elementos como arsênio, cádmio, mercúrio e chumbo.

3.2.4. Método de centrifugação para análise microbiológica

A análise microbiológica para detecção de *Escherichia coli*, *Salmonella*, ovos e larvas viáveis de helmintos foi realizada por centrifugação, conforme o método 9230B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

- Etapa de Preparação: A amostra foi diluída e colocada em tubos de centrifugação.
- Etapa de Centrifugação: Os tubos foram submetidos a altas rotações para sedimentação dos microrganismos.
- Etapa de Análise: O sedimento foi examinado para identificação de microrganismos patogênicos.

3.2.5. Extração líquido-líquido por funil separatório

A extração de poluentes e agrotóxicos foi realizada com base no Método EPA 3510C, utilizando a técnica de extração líquido-líquido.

- Etapa de Preparação: As amostras foram dissolvidas em solvente orgânico.

- Etapa de Extração: A mistura foi agitada em funil separatório para transferência dos compostos à fase orgânica.
- Etapa de Separação: As fases foram separadas e o extrato orgânico coletado.
- Etapa de Análise: O extrato foi analisado para identificar e quantificar compostos como solventes e agrotóxicos.

3.2.6. Determinação da umidade por métodos gravimétricos

A determinação da umidade foi feita com base na NBR 6457:2015, por método gravimétrico.

- Etapa de Pesagem Inicial: A amostra foi pesada em balança de alta precisão.
- Etapa de Secagem: A amostra foi aquecida a 110°C por 1 hora.
- Etapa de Pesagem Final: A amostra foi pesada novamente.
- Etapa de Cálculo: A umidade foi determinada pela diferença de massa.

3.2.7. Cultivo de *Bacillus subtilis*

O cultivo de *Bacillus subtilis* iniciou-se com inoculação em Erlenmeyer de 125 mL contendo 50 mL do meio Tryptone Soy Broth (TSB), sob agitação de 150 rpm a 35°C por 24 horas. Posteriormente, alíquotas de 10 mL foram transferidas para quatro Erlenmeyers com 40 mL de TSB, incubados por 96 horas nas mesmas condições. Cultivos foram coletados diariamente, filtrados, secos a 50°C por 24 horas, e pesados para montar a curva de crescimento bacteriano, conforme metodologia adaptada de Rocco et al. (2024).

3.2.8. Análise de biorremediação

A biorremediação foi conduzida utilizando suspensão de *Bacillus subtilis* aplicada sobre o lodo, em quatro grupos experimentais, conforme adaptação do método de Salmazo et al. (2024):

- Grupo Controle: Sem adição de microrganismo;
- Grupo A: 5% de suspensão;
- Grupo B: 10% de suspensão;
- Grupo C: 20% de suspensão.

As amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 14 dias. Coletas de 1 g foram realizadas nos dias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 14, diluídas em solução salina estéril (NaCl 0,9%),

homogeneizadas por 1 minuto e submetidas a diluições seriadas. As alíquotas diluídas foram usadas para contagem de microrganismos viáveis por técnica de *Pour Plate* com ágar PCA, incubadas a 35°C. Os resultados serviram como controle do sistema e seleção da diluição para testes específicos.

3.2.9. Metodologia para identificação de *Escherichia coli*, coliformes totais, bactérias heterotróficas e *Enterococcus* utilizando o Papel 3M™ Petrifilm™

A identificação microbiológica das amostras tratadas foi realizada utilizando o sistema 3M™ Petrifilm™, aplicando a técnica de contagem de unidades formadoras de colônias (UFC/mL). Alíquotas de 1 mL da diluição 10x foram inoculadas nos papéis específicos para *E. coli*, coliformes totais, bactérias heterotróficas e *Enterococcus*, com distribuição uniforme utilizando espátula estéril. As placas foram incubadas a 36°C, com leituras após 24 e 48 horas, conforme instruções da 3M. A metodologia foi baseada nos métodos 9221, 9230 e 9215 do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

3.3. Avaliação da biotecnologia de biorremediação como alternativa para tratamento do lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

A avaliação da aplicação da biotecnologia, por meio da biorremediação, no tratamento do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) foi conduzida com o objetivo de aprimorar o processo de estabilização e eliminar compostos tóxicos ou poluentes presentes nesse resíduo.

A estratégia adotada buscou integrar microrganismos ao processo de tratamento, destacando-se o uso do *Bacillus subtilis*, cuja aplicação visou proporcionar benefícios relacionados à redução de custos, aumento da eficiência e mitigação de impactos ambientais.

Alguns princípios fundamentais foram estabelecidos para a aplicação da técnica e avaliação de sua eficácia, dentre os quais se destacam:

- Aplicação direta utilizando a estrutura existente: A biorremediação foi planejada para ser integrada ao processo já implantado de tratamento de lodo, evitando modificações significativas nas instalações existentes e facilitando sua implementação.
- Ausência de necessidade de área extensa: O processo foi estruturado para ocorrer dentro da infraestrutura atual da ETE, sem necessidade de ampliação da área disponível ou

execução de obras para adequação, o que contribui para a redução de custos e impactos operacionais.

- Redução de custos: A biorremediação apresenta-se como uma alternativa mais sustentável e economicamente viável em comparação aos métodos tradicionais, ao diminuir a dependência de produtos químicos e tecnologias complexas, além de otimizar os recursos já disponíveis.

- Manutenção da operação do sistema: Um dos objetivos centrais da aplicação da técnica foi garantir que o processo de biorremediação não interferisse nas rotinas operacionais da ETE, permitindo a continuidade dos trabalhos sem alterações significativas.

Para verificar a compatibilidade entre o polímero utilizado na desidratação do lodo e a suspensão de *Bacillus subtilis*, foi realizado um teste específico. Essa verificação teve como finalidade assegurar que o polímero não comprometesse a atividade do microrganismo, fator essencial para a eficácia da biorremediação.

A seleção de uma forma adequada de aplicação da suspensão microbiana foi considerada um passo crítico para maximizar a atuação do *Bacillus subtilis* e garantir que o processo ocorresse sem prejuízo à qualidade do tratamento.

3.4. Verificação e proposta de processo para licenciamento da unidade de tratamento de lodo (UTL) e sua destinação

No processo de definição da proposta mais adequada de licenciamento para uma Unidade de Tratamento de Lodo (UTL) e sua destinação final, foram levantadas as legislações e normas técnicas vigentes que devem ser atendidas para garantir a conformidade legal e ambiental. A análise considerou critérios como a presença de comunidades no entorno (oportunidade), a eficiência do processo de tratamento (resultados) e a destinação do lodo gerado (desafio).

No aspecto da comunidade, foi identificada a oportunidade de integrar o tema ao ambiente escolar da rede pública municipal, promovendo ações de conscientização, educação ambiental e divulgação do processo de tratamento.

Quanto à eficiência do tratamento, foram avaliadas alternativas tecnológicas alinhadas à economia circular, com foco na reutilização do lodo e exclusão da disposição em aterros sanitários, mesmo considerando a existência de um aterro devidamente licenciado na região de Iperó, próxima a Sorocaba. O principal desafio consistiu em propor uma alternativa de

destinação do lodo como produto final apresentando-o como um adubo orgânico resultante do tratamento por biorremediação, com potencial de aplicação na agricultura local.

3.5. Pesquisa e elaboração de proposta de mercado para a destinação final do resíduo

Para a elaboração de uma proposta de mercado visando o reaproveitamento agrícola do lodo gerado em ETEs da região de Sorocaba/SP, foi estruturado um fluxograma de aplicação baseado na viabilidade do uso do lodo como fertilizante agrícola.

A proposta adotou o princípio da precaução, que envolve a gestão de riscos, o cumprimento da legislação ambiental vigente e o monitoramento contínuo dos impactos da aplicação. A estruturação metodológica foi dividida em duas etapas principais: uma análise qualitativa e outra quantitativa, integradas para proporcionar um diagnóstico completo sobre a viabilidade do reaproveitamento agrícola do lodo.

A pesquisa teve como orientação o princípio da precaução, com foco na gestão de riscos ambientais e sanitários. Foram considerados os seguintes aspectos:

- **Risco potencial de contaminação:** Avaliou-se a possibilidade de impactos ambientais e riscos à saúde pública decorrentes da utilização do lodo na agricultura, como a presença de metais pesados, patógenos e substâncias químicas perigosas. Essa análise baseou-se na qualidade do lodo produzido pelas ETEs da região e nas normas técnicas que regulamentam sua aplicação em solos agrícolas.

- **Projetos agronômicos:** Foram identificados os requisitos necessários para elaboração de projetos agronômicos que garantam o uso seguro e eficiente do lodo, em conformidade com a legislação. Esses requisitos incluem a definição das quantidades adequadas de aplicação, a compatibilidade com as características do solo e a seleção das culturas agrícolas mais apropriadas para receber o insumo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Estação de Tratamento de Esgoto A

O presente estudo foi conduzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) situada no município de Votorantim, estado de São Paulo.

O processo adotado por essa unidade contempla, inicialmente, uma etapa de tratamento preliminar voltada à remoção de sólidos grosseiros, seguida de um tratamento biológico realizado por meio de reatores de lodos ativados operando em batelada sequencial alternada.

Na etapa preliminar, ocorre a remoção de materiais sólidos que possam causar obstruções ou danos aos equipamentos eletromecânicos da estação. Esta etapa é composta por sistemas de gradeamento e desarenação, conforme Figura 4.

Figura 4 - Vista superior das etapas de tratamento de esgoto sendo, A entrada da ETE Salto do Guimarães; B vista superior da etapa de tratamento preliminar da unidade; C vista superior dos reatores e D vista superior da unidade



Fonte: Autor, 2024.

O gradeamento promove a retenção de sólidos em suspensão presentes no esgoto, como resíduos diversos e objetos de maior volume, por meio de grades instaladas no início do processo.

A seguir, o esgoto passa pelo desarenador, onde se realiza a separação de partículas sólidas de menor granulometria, como areia, pedriscos e cascalho.

Essa separação baseia-se na sedimentação provocada pela diferença de densidade entre os sólidos e a fração líquida, auxiliada pela ação da gravidade.

Os sólidos acumulam-se no fundo do equipamento, enquanto o esgoto permanece na parte superior, facilitando a remoção dos resíduos sedimentados.

O tratamento biológico é conduzido por meio do sistema de lodos ativados, com o objetivo de promover a remoção da matéria orgânica do efluente bruto.

Esse processo ocorre nos reatores biológicos (tanques de aeração), onde microrganismos aeróbios metabolizam a matéria orgânica na presença de oxigênio dissolvido.

Nesses reatores, o esgoto é misturado ao lodo ativado, sendo continuamente agitado e aerado para garantir condições ótimas à atividade biológica.

Após essa etapa, o efluente passa por um processo de decantação, no qual ocorre a separação do lodo ativado.

A maior parte do lodo sedimentado é recirculado para o tanque de aeração, de modo a manter uma concentração adequada de microrganismos no sistema.

A parcela excedente, denominada lodo excedente, é removida do processo com o intuito de equilibrar as taxas de crescimento microbiano e remoção.

O efluente clarificado é conduzido por overflow, sendo então caracterizado como efluente tratado final.

A vazão média de esgoto tratada pela ETE Guimarães é de aproximadamente 80 litros por segundo (80 L/s).

O tratamento do lodo gerado na unidade é realizado por meio de adensadores, seguido da etapa de desidratação mecânica, utilizando centrífugas, conforme Figura 5.

Figura 5 - Etapas seguintes para a unidade de tratamento do lodo da ETE Salto do Guimarães, sendo A Casa de sopradores, B adensadores etapa de tratamento do lodo, C tanque de preparo da solução de polímero para etapa de tratamento do lodo e D centrífugas



Fonte: Autor, 2024.

4.1.1. Controle do Processo de Tratamento de Esgoto

O controle do processo de tratamento de esgoto na unidade em estudo é realizado por meio da análise de parâmetros físico-químicos essenciais, tais como pH, turbidez, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a eficiência de remoção da matéria orgânica.

As coletas de amostras são conduzidas semanalmente, sendo do tipo composta, formadas a partir de alíquotas coletadas em ciclos de 12 a 24 horas, a fim de representar adequadamente as variações do sistema.

Complementarmente, a cada dois meses são realizadas coletas pontuais, cujas amostras são encaminhadas a um laboratório analítico externo, terceirizado e acreditado conforme os requisitos da norma ISO/IEC 17025.

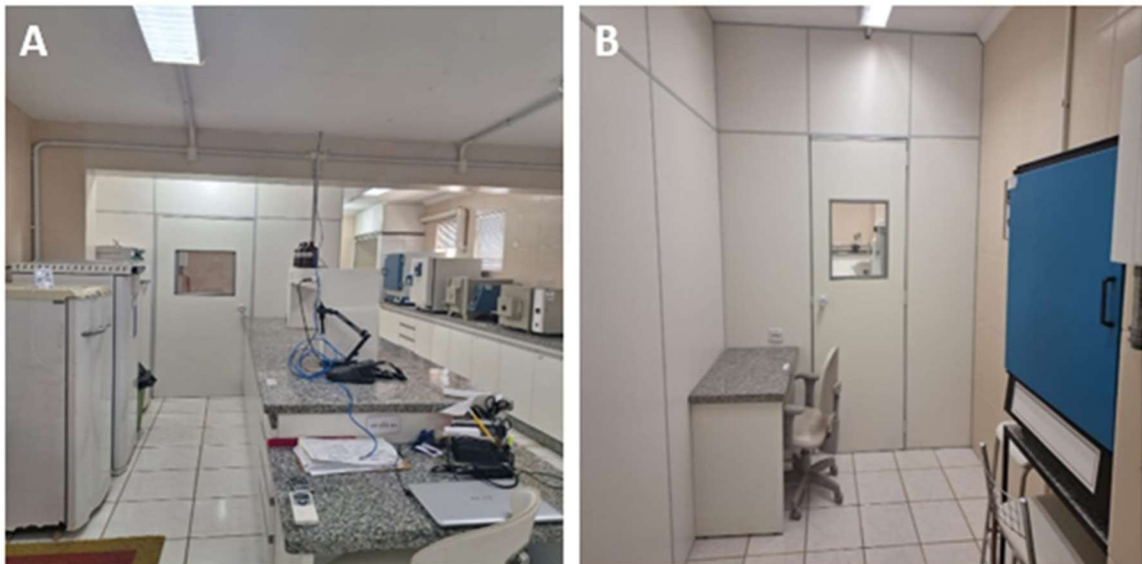
O objetivo principal desse controle analítico é monitorar e quantificar a eficiência da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em diferentes condições operacionais, tais como: ocorrência de chuvas intensas, intervenções de manutenção e possíveis episódios de arraste de lodo.

As amostras enviadas ao laboratório externo são analisadas conforme os parâmetros estabelecidos no Decreto Estadual nº 8.468, de 08 de setembro de 1976.

Para os pontos de montante e jusante, os parâmetros avaliados seguem o disposto no Artigo 11 do referido decreto. Já para os pontos de afluente e efluente, os critérios de análise estão descritos no Artigo 18.

Para a realização das análises microbiológicas do lodo gerado na estação, foi estruturada uma subdivisão específica no laboratório da unidade, com a implantação de um setor analítico voltado exclusivamente à microbiologia. Essa adequação teve como finalidade garantir o atendimento às normas de biossegurança vigentes, assegurando a segregação adequada das atividades e a minimização de riscos biológicos associados às amostras, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Vista do laboratório de microbiologia, sendo A vista externa do laboratório de microbiologia e B vista interna do laboratório de microbiologia



Fonte: Autor, 2024.

4.2. Destinação do Lodo da ETE

Atualmente, a destinação adotada para o lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Salto do Guimarães consiste na disposição deste resíduo em aterro sanitário, o que implica elevados custos operacionais.

Com o objetivo de explorar uma alternativa sustentável de reaproveitamento, voltada para a economia circular, o estudo propõe a utilização do lodo, previamente tratado e livre de patógenos, na agricultura.

A avaliação de alternativas de tratamento, especialmente aquelas que envolvem a digestão biológica em escala, seja aeróbica ou anaeróbica, em condições mesófilas ou termofílicas, busca identificar a viabilidade de utilizar o lodo de esgoto tratado como fertilizante agrícola.

A qualidade microbiológica do lodo, nesse contexto, pode ser analisada por meio de diversos indicadores de poluição fecal, os quais são determinantes para selecionar o parâmetro de controle mais apropriado para o tratamento (LOPEZ et al., 2019).

Para o presente estudo, foram escolhidos os seguintes indicadores microbiológicos: bactérias heterotróficas, coliformes termotolerantes e enterococos.

Cabe ressaltar que a caracterização do efluente foi realizada com base nos parâmetros de controle de qualidade e operação, visando garantir que o lodo tratado atenda aos requisitos legais para ser utilizado na agricultura.

A caracterização físico-química do efluente tratado demonstrará seu potencial de valorização como fertilizante agrícola, considerando sua carga de matéria orgânica e macronutrientes.

Para tanto, foram considerados as referências legais pertinentes e as condições operacionais da unidade, que dependem da contaminação inicial do lodo e da temperatura interna do material sólido (SANTOS et al., 2020).

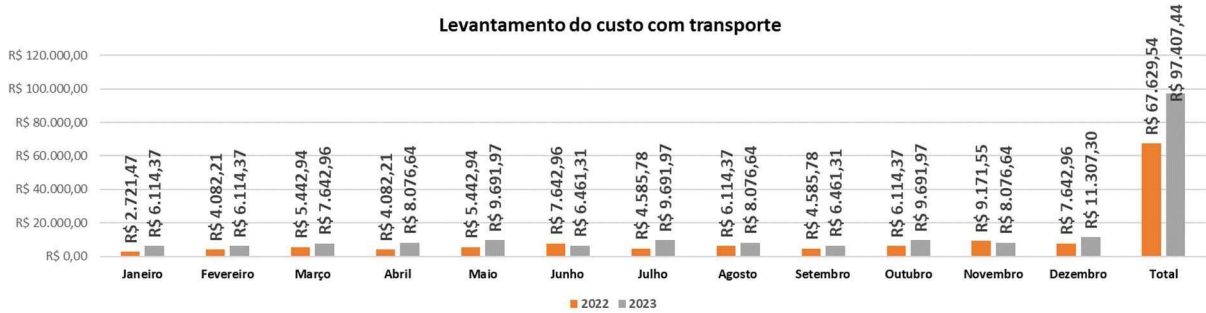
Em contrapartida, práticas convencionais de adubação em agroecossistemas têm como objetivo o fornecimento de nutrientes biodisponíveis, por meio do uso de fertilizantes minerais. Uma alternativa consolidada e sustentável para a recuperação da fertilidade do solo a longo prazo é o uso de fertilizantes orgânicos, o que representa uma estratégia eficaz para evitar a disposição de matéria orgânica proveniente de resíduos urbanos e lodo de esgoto em aterros sanitários (PICARIELLO et al., 2020).

4.2.1. Custos Financeiros

O armazenamento do lodo gerado na ETE é realizado em caçambas localizadas in loco na unidade, sendo o transporte do resíduo feito por meio de caminhões. A destinação final deste resíduo ocorre por meio de sua disposição em aterro licenciado.

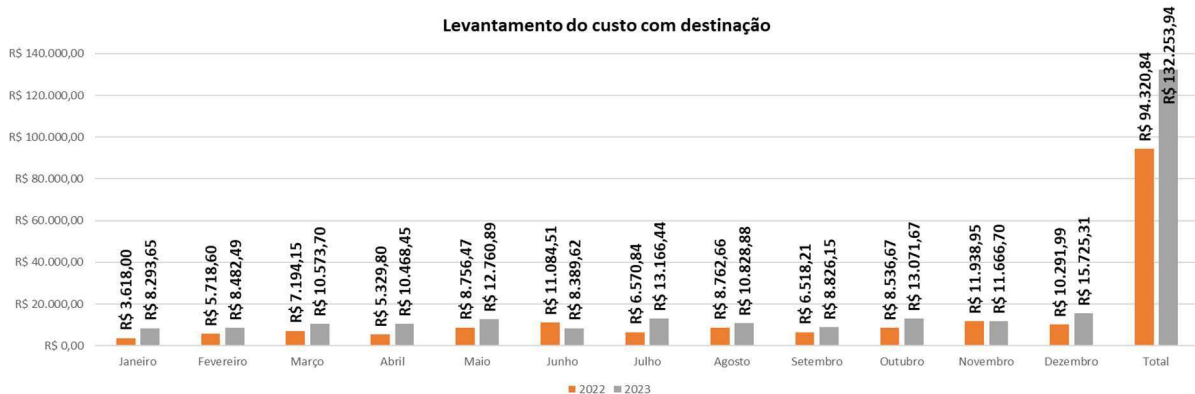
Atualmente, os custos relacionados ao transporte e à destinação final do lodo representam um dos maiores custos operacionais da unidade de tratamento, ocupando a segunda posição entre os custos mais elevados, conforme ilustrado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Levantamento do custo com transporte do lodo da ETE



Fonte: Autor, 2024.

Figura 8 - Levantamento do custo com destinação do lodo da ETE



Fonte: Autor, 2024.

Observou-se uma variação significativa na quantidade de lodo gerado na Estação de Tratamento A entre os anos de 2022 e 2023, conforme demonstrado na Tabela 1. O volume

total destinado aumentou de 630 toneladas para 839 toneladas, representando uma elevação de 33,02%. Esse acréscimo pode estar associado a diferentes fatores operacionais, incluindo condições climáticas, variações na carga afluyente e ajustes nos sistemas de tratamento, especialmente nas etapas de aeração e decantação.

Apesar do aumento global, identificou-se anteriormente uma redução nos valores de referência em determinados períodos, o que pode ser atribuído às melhorias implementadas nas malhas difusoras dos reatores C dos três módulos da unidade. Tais intervenções impactaram diretamente na eficiência do processo biológico, refletindo na quantidade de lodo gerado.

O comportamento sazonal também foi evidente, com picos expressivos nos meses de julho e dezembro de 2023, possivelmente relacionados ao aumento da carga hidráulica ou ao arraste de sólidos por eventos pluviométricos intensos. A análise dos dados mensais reforça a importância de se adotar estratégias de gerenciamento mais eficazes para o lodo gerado, com o objetivo de otimizar o desempenho do processo e minimizar os custos operacionais relacionados ao transporte e à disposição final do resíduo.

Tabela 1 - Quantidade de lodo gerado na ETE (t) nos anos de 2022 e 2023

Quantidade de Geração de Lodo na Estação de Tratamento A		
Lodo destinado (t)	2022	2023
Janeiro	27	54
Fevereiro	42	55
Março	53	68
Abril	39	68
Maio	57	82
Junho	72	54
Julho	42	85
Agosto	57	67
Setembro	42	55
Outubro	55	81
Novembro	77	72
Dezembro	66	98
Total	630	839

Fonte: Autor, 2024.

4.3. Resultados da Avaliação das Características Físico-Químicas e Bacteriológicas do Resíduo e Sua Caracterização

A caracterização do resíduo gerado na Estação de Tratamento foi conduzida por meio da análise de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, com o objetivo de avaliar sua composição e potencial de reaproveitamento. Foram determinados os teores de carbono orgânico total, nitrogênio total, sólidos totais, sólidos voláteis, pH e percentual de massa sólida.

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, verificou-se que a maior parte da composição do lodo é de origem orgânica, predominantemente constituída por elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, o que confere ao material um potencial significativo para biodegradação.

Tabela 2 - Resultados físico-químicos referentes a caracterização do lodo

Resultados Analíticos Físico - Químicos				
Parâmetro	Unidade	LD	LQ / Faixa	Resultados
Percentual de Massa Sólida	%	N.A.	N.A.	16,26
Carbono Orgânico Total	mg/Kg	900	3.000	285.561
Nitrogênio Amoniacal	mg/Kg	0,3	1,0	154,7
Nitrogênio Kjeldahl	mg/Kg	0,3	1,0	2.709,1
Nitrato (como N)	mg/Kg	0,15	0,5	3,9
Nitrito (como N)	mg/Kg	0,15	0,5	< 0,50
pH	N.A.	N.A.	1-13	8,74
Sólidos Voláteis	%	0,0003	0,001	10,755
Sólidos Totais	mg/Kg	0,3	1	161.362

Fonte: Laudo do Laboratório Oceanus, adaptado pelo autor, 2023.

Destaca-se, ainda, a presença de valores elevados de carbono orgânico total, evidenciando a expressiva fração orgânica do resíduo.

Essa característica é relevante do ponto de vista ambiental e agrônômico, pois indica a possibilidade de aproveitamento do lodo como condicionador de solo ou fertilizante orgânico, desde que atendidos os critérios legais e sanitários exigidos para tal finalidade.

Os resultados microbiológicos obtidos, apresentados na Tabela 3, indicam a presença significativa de *Escherichia coli* no lodo analisado, sugerindo uma associação direta entre sua concentração e o teor de matéria orgânica presente no resíduo.

Além disso, foram detectados ovos e larvas viáveis de helmintos, o que reforça a necessidade de cuidados adicionais quanto à segurança sanitária do material.

No contexto dos ensaios de redução microbiológica, a *Escherichia coli* é adotada como principal indicador, uma vez que sua redução não ocorre de maneira eficaz apenas por meio do armazenamento ou pela exposição prolongada.

Este parâmetro microbiológico é amplamente utilizado para o monitoramento ambiental, sendo exigido em pontos de controle situados a montante e jusante do lançamento do efluente tratado, com o objetivo de verificar a eficiência da remoção microbiológica e a preservação da qualidade dos corpos hídricos receptores.

No caso específico da Estação de Tratamento de Esgoto em estudo, observa-se a necessidade de implementação de uma etapa adicional de tratamento, correspondente ao tratamento terciário, a fim de garantir a redução satisfatória da carga de *E. coli*.

Por outro lado, a presença de ovos e larvas viáveis de helmintos pode ser controlada de maneira mais eficiente por meio da gestão das condições térmicas do processo, visto que, em clima tropical, como o brasileiro, a inibição do desenvolvimento embrionário desses organismos é favorecida por temperaturas elevadas, o que contribui para a sua eliminação durante o tratamento.

Tabela 3 - Resultados microbiológicos referentes a caracterização do lodo da ETE A

Resultados Analíticos Microbiológicos				
Parâmetro	Unidade	LD	LQ / Faixa	Resultados
<i>Escherichia coli</i>	NMP/g	-	1,8	984,0
<i>Salmonella</i>	NMP/10g	-	1,8	< 1,8
Ovos e larvas viáveis de Helmintos	Ovos e larvas/g	-	0,1	3,69
Enterovírus	UFP/g	0,1	-	Ausente

Fonte: Laudo do Laboratório Oceanus, adaptado pelo autor, 2023.

A Tabela 4 apresenta os resultados analíticos obtidos nos ensaios para metais pesados, os quais evidenciam a detecção de todas as concentrações analisadas.

Entre os elementos identificados, os que apresentaram maiores concentrações foram bário, cobre, zinco, enxofre e fósforo.

A presença desses metais no lodo indica a necessidade de monitoramento contínuo, especialmente em se tratando de sua potencial aplicação agrícola, tendo em vista os limites estabelecidos por normas ambientais específicas para uso em solos, visando garantir a segurança ambiental e sanitária.

Tabela 4 - Resultados de metais referentes a caracterização do lodo da ETE A

Resultados Analíticos de Metais				
Parâmetro	Unidade	LD	LQ / Faixa	Resultados
Arsênio total	mg/Kg	0,003	0,01	3,20
Bário total	mg/Kg	0,015	0,05	543,84
Cádmio total	mg/Kg	0,015	0,05	0,84
Chumbo total	mg/Kg	0,015	0,05	23,43
Cobre total	mg/Kg	0,15	0,5	139,0
Cromo total	mg/Kg	0,015	0,05	37,83
Mercúrio total	mg/Kg	0,0027	0,009	0,632
Molibdênio total	mg/Kg	0,015	0,05	4,91
Níquel total	mg/Kg	0,03	0,1	109,3
Selênio total	mg/Kg	0,15	0,5	2,3
Zinco total	mg/Kg	1,50	5	1.853
Fósforo total	mg/Kg	0,30	1	144.66
Potássio total	mg/Kg	0,30	1	2.581
Sódio total	mg/Kg	1,50	5	792
Enxofre total	mg/Kg	30,0	100	12.615
Cálcio total	mg/Kg	1,50	5	84.825
Magnésio total	mg/Kg	1,51	5	3.306

Fonte: Laudo do Laboratório Oceanus, adaptado pelo autor, 2023.

Esses metais apresentam potencial para serem submetidos a processos de degradação por meio da biorremediação, uma estratégia que utiliza microrganismos para promover a redução das concentrações de substâncias tóxicas e/ou poluentes.

Essa abordagem tem se mostrado eficaz na diminuição da toxicidade de metais presentes em resíduos sólidos, podendo viabilizar sua utilização como fertilizante orgânico, desde que sejam atendidos os critérios de segurança ambiental estabelecidos pela legislação vigente.

Os resultados obtidos na caracterização físico-química e microbiológica do lodo estiveram em conformidade com os valores de referência preconizados pelas normas técnicas aplicáveis, em especial as normas ABNT NBR 10004, NBR 10005 e NBR 10006, que orientam a classificação e avaliação de resíduos sólidos quanto ao lixiviado e ao solubilizado.

Os parâmetros físico-químicos analisados incluindo pH, teor de matéria orgânica, concentração de nutrientes e presença de metais pesados apresentaram valores compatíveis com os limites definidos pelos órgãos ambientais reguladores para resíduos de origem sanitária.

Da mesma forma, os resultados microbiológicos, que incluíram a quantificação de coliformes fecais e outros microrganismos indicativos, estiveram dentro dos padrões esperados para resíduos provenientes do tratamento de esgoto.

Tais análises foram fundamentais para o direcionamento do estudo, possibilitando uma compreensão aprofundada das propriedades do lodo e contribuindo para a definição dos métodos de tratamento e de manejo mais apropriados, especialmente no que se refere à sua aplicação segura em áreas agrícolas.

Dessa forma, os dados obtidos não apenas confirmaram as hipóteses iniciais do estudo, como também forneceram subsídios para a elaboração das etapas subsequentes da pesquisa, orientando as decisões relacionadas à viabilidade agrônômica e ambiental do reaproveitamento do lodo.

4.3.1. Tratamento do Lodo com Bacilos – Processo de Biorremediação

No experimento de biorremediação, foram preparados quatro grupos contendo 100 gramas de lodo cada, aos quais foram adicionadas suspensões com diferentes concentrações do microrganismo *Bacillus subtilis*.

O Grupo A recebeu 0,06 g de bacilos; o Grupo B, 0,12 g; e o Grupo C, 0,24 g. O Grupo Controle foi mantido sem adição de microrganismos.

A Tabela 5 apresenta os dados obtidos durante a aplicação do *B. subtilis* nas amostras de lodo, as quais foram submetidas a diferentes condições experimentais, incluindo tempos de incubação de 10 e 16 dias e diluições de 1%, 5% e 10%.

Todas as amostras foram analisadas em triplicata, conforme as melhores práticas experimentais, a fim de assegurar a reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados.

Tabela 5 - Resultado da análise de contagem de microrganismos após o tratamento do lodo com a suspensão de bacilos nas concentrações de 1%, 5% e 10% após 10 dias de tratamento

UFC/mL - 10 dias					
Leituras		<i>E-coli</i>	Coliformes totais	Bac. Heterotrófica	<i>Enterococcus</i>
24h	Branco	0,3	892	1483	5
	1%	0,7	525	800	6
	5%	3,7	783	983	22
	10%	3,3	375	342	0
48h	Branco	0,3	908	687,5*	127*
	1%	0,7	533	925	55
	5%	3,7	858	1200	100*
	10%	4,0	383	600	72,5*

*erro de leitura indicando UFC incontáveis em uma das triplicatas

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados obtidos demonstraram que o tratamento com suspensão de *Bacillus subtilis* resultou em redução na carga microbiana do lodo, especialmente no que se refere aos coliformes fecais.

Observou-se que a suspensão a 10% promoveu uma diminuição de aproximadamente 2,4 vezes nas Unidades Formadoras de Colônia (UFC) desses microrganismos.

Para as bactérias heterotróficas, no entanto, foi verificada inconsistência nos resultados obtidos após 48 horas de incubação.

Tal variação pode estar relacionada a múltiplos fatores, incluindo a flutuação na viabilidade do microrganismo ao longo do tempo, interferências ambientais durante o ensaio ou, ainda, a possível necessidade de ajustes nas condições iniciais de cultivo e na concentração do inóculo de *B. subtilis*.

Esses resultados preliminares reforçam a importância da realização de novos ensaios, com o objetivo de definir de forma mais precisa as condições ideais de incubação, diluição e tempo de exposição.

O microrganismo *Bacillus subtilis* é amplamente reconhecido por sua capacidade de produzir diversos peptídeos antimicrobianos, como bacteriocinas e lipopeptídeos, incluindo surfactina, fengicina e iturina.

Esses compostos atuam rompendo as membranas celulares de microrganismos patogênicos, o que justifica sua aplicação em áreas como conservação de alimentos, controle fitossanitário e terapias médicas (SONG; ZHOU; PAN, 2024).

As propriedades antimicrobianas do *B. subtilis* também têm sido exploradas em estratégias de biocontrole agrícola, especialmente devido à sua capacidade de produzir compostos bioativos estáveis e versáteis, o que o torna uma ferramenta promissora para soluções sustentáveis (ABRIOUEL et al., 2011).

No que diz respeito à redução de *Escherichia coli*, os resultados, embora não tenham indicado uma diminuição expressiva na concentração do patógeno, apresentaram uma tendência coerente de redução, ainda que modesta.

Tal comportamento sugere que o processo de biorremediação estava em curso, ainda que em fase inicial.

A redução parcial observada pode ser atribuída à atividade metabólica do *B. subtilis*, que, ao promover a biodegradação da matéria orgânica presente no lodo, pode interferir na viabilidade de patógenos como *E. coli* (OLIVEIRA, 2021).

A eficácia da biorremediação com *B. subtilis*, no entanto, depende de uma série de variáveis, como a concentração do microrganismo inoculado, o tempo de incubação e a carga orgânica do substrato.

Os resultados obtidos indicam que, embora o microrganismo tenha demonstrado potencial para redução da carga microbiológica, é necessário um refinamento dos parâmetros experimentais para alcançar maior eficiência no processo.

A continuidade dos ensaios, com ajustes nos níveis de diluição, tempo de incubação e controle das condições ambientais, é considerada essencial para otimizar a eficácia da biorremediação e atender aos padrões exigidos para o parâmetro *Escherichia coli*.

Os dados obtidos no novo ciclo de ensaios, apresentados na Tabela 6, reforçaram essa tendência, evidenciando uma redução consistente no número de UFC de *E. coli*.

Esses resultados fortalecem a hipótese de que o *Bacillus subtilis* apresenta atividade antimicrobiana efetiva contra esse patógeno, sendo, portanto, uma alternativa viável no aprimoramento dos processos de tratamento e sanitização de lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto.

Tabela 6 - Resultados apresentados do segundo ciclo de ensaios no tratamento de 1 e 2 dias com diferentes concentrações dos bacilos

		UFC/mL			
Tratamento dia		<i>E-coli</i>	Coliformes totais	Bac. Heterotrófica	Enterococcus
1	Branco	10	4567	13667	13
	5%	20	1167	13125*	13
	10%	6,7	1083	16583	10
	20%	0,0	1183*	4750	27
2	Branco	17	1617	9100	110
	5%	0	2400	14000	7
	10%	0	4125	13875	187
	20%	incontável	incontável	incontável	40

*erro de leitura indicando UFC incontáveis em uma das triplicatas

Fonte: Autor, 2024.

Observou-se um comportamento semelhante ao descrito na Tabela 5 quando aplicada a suspensão de *Bacillus subtilis* a 10% no primeiro dia de incubação. A partir do segundo dia, entretanto, os resultados passaram a apresentar alterações significativas, com tendência persistente até o 14º dia.

Nos dias 7 e 14, os dados se mostraram inculcáveis para todos os grupos microbianos avaliados, impossibilitando uma quantificação precisa da carga microbiológica.

Em relação à contagem de bactérias heterotróficas, constatou-se um aumento nas Unidades Formadoras de Colônia (UFC), o que pode ser explicado pela própria natureza heterotrófica do *Bacillus subtilis*.

Assim, a elevação na contagem pode refletir não apenas a população original desses microrganismos, mas também o crescimento do inóculo introduzido.

Diante dessa observação, torna-se evidente a necessidade de realização de novos ensaios, com ajustes nas condições experimentais, incluindo variações de diluição e estratégias de tratamento complementar, visando à obtenção de reduções microbiológicas mais abrangentes.

Os resultados demonstraram que concentrações de 5% e 10% de *Bacillus subtilis*, associadas a um tempo de incubação de 2 dias, foram eficazes na redução de *Escherichia coli*, coliformes totais, bactérias heterotróficas e enterococos, corroborando as hipóteses estabelecidas no estudo. Esses achados indicam que a aplicação da suspensão microbiana, nessas condições, constitui uma alternativa eficiente para o tratamento microbiológico do lodo.

A introdução do *B. subtilis* diretamente no tanque de preparo do polímero pode representar uma estratégia operacional viável, considerando que a ação antimicrobiana contribui significativamente para a redução da carga patogênica do resíduo, promovendo sua adequação ao uso como adubo orgânico, desde que cumpridos os critérios normativos de segurança ambiental.

A condição experimental composta por 5% ou 10% de concentração microbiana e tempo de incubação de 2 dias mostrou-se ideal do ponto de vista técnico-operacional, equilibrando a atividade antimicrobiana com a necessidade de celeridade nos processos de tratamento.

Tal configuração favorece a integração contínua da biorremediação ao sistema convencional de tratamento de esgoto, sem a imposição de longos períodos de retenção, contribuindo para a eficiência operacional e viabilidade econômica do processo.

Comparativamente aos estudos presentes na literatura, os dados obtidos se destacam pela eficácia alcançada em um intervalo de incubação reduzido (2 dias), aspecto relevante do ponto de vista de aplicação em escala real, considerando as limitações práticas associadas a tratamentos mais prolongados.

Com base nos resultados e nos requisitos operacionais observados, recomenda-se a aplicação de *Bacillus subtilis* a 5% por um período de 2 dias como condição otimizada para a biorremediação do lodo sanitário.

As variações observadas entre os tempos de incubação, quando comparadas a dados de outros trabalhos, podem ser atribuídas a fatores como diferenças nas cepas de *B. subtilis* utilizadas, condições experimentais específicas, ou ainda à interação da bactéria com o polímero empregado no processo.

Ademais, a literatura aponta que a eficiência do *Bacillus subtilis* pode variar de acordo com as características do lodo, tais como composição físico-química, pH, temperatura e concentração de nutrientes, o que pode justificar as discrepâncias entre os estudos (OLIVEIRA, 2021).

Apesar dessas variações, os resultados obtidos alinham-se às tendências gerais identificadas na literatura científica, reafirmando o potencial do *Bacillus subtilis* como agente biorremediador eficaz na redução de patógenos em lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

4.4. Avaliação da Biotecnologia de Biorremediação como Alternativa para o Tratamento do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que a incorporação de *Bacillus subtilis* ao processo de tratamento do lodo, em associação com o uso de polímero catiônico, configura-se como uma alternativa tecnicamente viável. A aplicação direta do microrganismo no tanque de preparo do polímero infraestrutura já existente e em operação na unidade de tratamento representa uma estratégia eficiente, de baixo custo operacional e fácil integração ao sistema atual, conforme ilustrado na Figura 9.

A proposta demonstrou-se eficaz na redução da carga microbológica do lodo, indicando o potencial da biotecnologia de biorremediação como solução complementar ou alternativa às etapas convencionais de tratamento, especialmente em contextos que exigem sustentabilidade e otimização de recursos.

Figura 9 - Tanque de preparo da solução de Polímero existente na unidade



Fonte: Autor, 2024.

Essa estratégia permite a integração do processo de biorremediação ao sistema operacional já existente na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), sem a necessidade de investimentos significativos em novos equipamentos ou modificações estruturais expressivas. Essa característica torna a solução economicamente viável e operacionalmente prática.

A utilização do tanque de preparo do polímero como ponto de inoculação da bactéria *Bacillus subtilis* apresenta vantagens adicionais, como a possibilidade de monitoramento contínuo das condições favoráveis ao crescimento bacteriano e a facilidade de inserção direta

do agente biológico no fluxo do processo de tratamento. Com isso, há uma redução no tempo necessário para o tratamento do lodo, ao mesmo tempo em que se maximiza a eficácia do *Bacillus subtilis* como agente biorremediador no controle de patógenos, conforme evidenciado pelos ensaios microbiológicos realizados.

No estudo de caso analisado, o polímero utilizado é do tipo catiônico, em conformidade com o perfil da unidade, voltada ao tratamento de esgoto doméstico, e não industrial. O processo de aplicação do polímero catiônico no adensamento do lodo na unidade em questão compreende as seguintes etapas:

- **Pré-dissolução do polímero:** O polímero em pó é diluído em água, formando uma solução de baixa concentração. A dissolução ocorre de maneira gradual e controlada, a fim de evitar a formação de grumos e garantir uma mistura homogênea (VON SPERLING, 2005).
- **Dosagem controlada:** A dosagem do polímero é ajustada de acordo com a quantidade de lodo a ser tratada, com o auxílio de sistemas automatizados que otimizam o processo (TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).
- **Mistura e floculação:** Após a aplicação do polímero, o lodo é submetido à agitação, inicialmente vigorosa para promover a dispersão uniforme, seguida de uma agitação mais branda, que favorece a formação e agregação dos flocos (ANDREOLI et al., 2009).
- **Sedimentação:** Após a floculação, o lodo permanece em repouso para sedimentação dos flocos. O lodo adensado é então removido do fundo do tanque e encaminhado à etapa de desidratação por centrifuga (METCALF & EDDY, 2016).

Com base nos resultados dos testes de compatibilidade, foram identificadas as melhores formas de aplicação da suspensão de *Bacillus subtilis*, a saber:

- **Aplicação direta na caçamba de lodo:** Essa abordagem permite que o microrganismo atue diretamente sobre o lodo, favorecendo a degradação dos contaminantes sem a introdução de novas etapas no processo.
- **Aplicação após o processo de centrifugação:** A inoculação após a desidratação concentra a atividade da biorremediação em uma fração mais densa do lodo, potencializando os efeitos do tratamento.
- **Aplicação no tanque de preparo do polímero:** Essa alternativa aproveita a estrutura operacional já existente, permitindo a inserção da bactéria durante a preparação do lodo, de forma integrada às etapas subsequentes do processo.

Essas possibilidades foram testadas com o objetivo de assegurar a eficácia da biorremediação sem comprometer o desempenho do sistema de tratamento ou a continuidade operacional da ETE.

4.5. Verificação do processo de licenciamento

A Unidade de Tratamento de Lodo (UTL) vinculada às Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) exerce função essencial na gestão dos resíduos sólidos resultantes do processo de purificação das águas residuais.

O lodo gerado durante esse processo, por ser composto por sólidos orgânicos, metais pesados, nutrientes e diversos outros contaminantes, demanda tratamento e destinação final adequados, a fim de mitigar impactos ambientais e sanitários.

As etapas de desidratação, estabilização e descarte final devem obedecer a padrões técnicos e legais, garantindo segurança e sustentabilidade.

O funcionamento e o licenciamento dessas unidades estão subordinados a um conjunto normativo que visa assegurar a conformidade ambiental, o controle sanitário e o alinhamento com as melhores práticas técnicas.

Nesse cenário, a utilização do lodo tratado como fertilizante orgânico ou biofertilizante representa uma oportunidade de reaproveitamento sustentável, conforme estabelece a Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020, que regulamenta a aplicabilidade agrícola do lodo, desde que atendidos os critérios legais vigentes.

A verificação do processo de licenciamento da UTL envolve uma proposta metodológica estruturada, que compreende as etapas sequenciais exigidas para a obtenção das licenças, acompanhada da identificação das legislações e normas técnicas aplicáveis. Inicialmente, realiza-se um estudo de viabilidade, com o objetivo de avaliar a necessidade da unidade, as condições operacionais e os impactos potenciais.

Esse estudo deve contemplar a quantificação do lodo gerado, as alternativas de tratamento (como desidratação e estabilização), bem como a análise de impactos ambientais, como emissões gasosas, contaminação de solos e águas e riscos à biodiversidade.

Com base nos dados obtidos, elabora-se o projeto detalhado da unidade, incluindo o dimensionamento das estruturas, os sistemas de controle ambiental e o plano de gestão de resíduos. Esse documento é submetido aos órgãos competentes, junto à requisição das licenças necessárias, como licenças ambientais, sanitárias, de construção e operação. As entidades

reguladoras realizam, então, uma avaliação técnica e ambiental do projeto, com base nos impactos diretos e indiretos identificados, bem como nos riscos à saúde pública, como a presença de patógenos e metais pesados no lodo.

A depender da complexidade do projeto, poderá ser exigida a realização de audiências públicas, que possibilitam a participação da comunidade local e de partes interessadas, promovendo a transparência e o aperfeiçoamento do processo.

Com base nessas avaliações, as licenças são emitidas, autorizando a construção e posterior operação da unidade, bem como a destinação final do lodo tratado.

Após a implementação da UTL, o lodo gerado na ETE é submetido aos processos de desidratação e estabilização, reduzindo sua umidade, controlando a decomposição orgânica e minimizando a emissão de odores.

O lodo pode passar ainda por tratamentos adicionais, como compostagem ou digestão anaeróbica, contribuindo para a redução de patógenos e geração de subprodutos, como o biogás. A destinação final depende da qualidade do lodo tratado, podendo incluir sua aplicação em solos agrícolas, o coprocessamento em indústrias cimenteiras ou a disposição em aterros sanitários.

Todo o processo deve observar rigorosamente as legislações e normas técnicas aplicáveis.

No âmbito estadual, destacam-se a Norma CETESB P4.230 (São Paulo, 1999) e a norma do IAP (Paraná, 2003), que regulamentam o uso do lodo de ETE na agricultura.

No âmbito federal, incluem-se o Decreto nº 4.954/2004 e as Instruções Normativas nº 28/2005, nº 25/2009, nº 27/2006 e nº 61/2020, do MAPA, além da Resolução CONAMA nº 375/2006, que estabelece os critérios para o uso agrícola de resíduos orgânicos.

O cumprimento das normas de qualidade do lodo, das emissões, de saúde e segurança ocupacional, e de transporte e armazenamento é imprescindível para garantir uma gestão segura e sustentável.

A conformidade com esse arcabouço legal e técnico assegura que as unidades de tratamento de lodo operem em consonância com os princípios da responsabilidade ambiental e da proteção à saúde pública. A Figura 10 representa um resumo de todo o processo de licenciamento.

Figura 10 - Fluxograma resumo de licenciamento e disposição do lodo de ETE



Fonte: Autor, 2024.

4.6. Pesquisa e Elaboração de Proposta de Mercado para a Destinação Final do Resíduo como Produto Comercializável ou por Meio de Acordos Cooperativos

A normativa publicada em 2020 representa um marco significativo no tratamento e na destinação do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), ao estabelecer diretrizes técnicas claras e detalhadas para seu uso na agricultura.

Essa regulamentação autoriza a utilização irrestrita do lodo tratado como fertilizante orgânico em todas as culturas agrícolas, desde que atendidos os requisitos de tratamento capazes de garantir a segurança e a qualidade do produto final.

A possibilidade de aplicação tanto para produtos classificados como tipo A quanto tipo B amplia substancialmente as alternativas de aproveitamento agrícola, viabilizando uma gestão mais eficiente dos resíduos urbanos.

A conversão do lodo tratado em insumo agrícola transcende a simples lógica da destinação de resíduos, estando fortemente alinhada aos princípios da economia circular. Tal

abordagem promove a reciclagem de resíduos urbanos em recursos úteis, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do uso de fertilizantes sintéticos, cujo impacto ambiental como a eutrofização de corpos hídricos e a acidificação dos solos é amplamente reconhecido. Assim, a normativa não apenas favorece a gestão integrada dos resíduos, mas também reforça práticas sustentáveis na agricultura, ao minimizar impactos ambientais e maximizar a eficiência no uso de recursos naturais.

4.6.1. Benefícios Ambientais e Econômicos do Uso do Lodo Tratado como Fertilizante Orgânico

A aplicação do lodo de ETE tratado como fertilizante orgânico proporciona uma série de benefícios ambientais e agrônômicos.

O resíduo tratado constitui uma fonte relevante de matéria orgânica, elemento essencial para a melhoria da qualidade física, química e biológica dos solos.

A incorporação de matéria orgânica contribui para o aumento da capacidade de retenção hídrica, especialmente vantajosa em regiões sujeitas à escassez de água.

Adicionalmente, a estrutura do solo é beneficiada, com maior aeração e desenvolvimento radicular mais eficiente.

Outro aspecto relevante é o fornecimento de macronutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, os quais promovem a fertilidade do solo e elevam a produtividade das culturas agrícolas.

O uso do lodo também pode contribuir para a supressão de microrganismos fitopatogênicos, reduzindo a necessidade do uso de defensivos químicos e promovendo a saúde do solo de forma mais sustentável.

Do ponto de vista ambiental, a destinação do lodo tratado à agricultura contribui para a redução da sobrecarga de aterros sanitários, evitando emissões de gases de efeito estufa, como o metano, comumente associados à decomposição anaeróbica desses resíduos. Dessa forma, converte-se um passivo ambiental em recurso produtivo, em consonância com os princípios da sustentabilidade.

4.6.2. Implicações Econômicas para a Agricultura Local e a Gestão de Resíduos

A implementação da normativa de 2020 acarreta impactos econômicos positivos, especialmente no que tange à redução de custos na produção agrícola.

A substituição parcial ou total de fertilizantes sintéticos por adubo orgânico derivado de lodo tratado reduz a dependência de insumos industriais, cuja fabricação demanda elevado consumo energético e financeiro.

No contexto regional de Sorocaba, por exemplo, propõe-se a comercialização do adubo orgânico produzido a partir do lodo de ETE como estratégia para atender à demanda local e, simultaneamente, promover práticas agrícolas mais acessíveis e sustentáveis.

O fornecimento do produto a granel configura-se como uma alternativa logística eficiente, ao reduzir custos com embalagens e permitir a adequação das quantidades fornecidas às necessidades específicas de cada propriedade rural.

Essa flexibilidade operacional favorece uma aplicação mais racional dos insumos, contribuindo para o aumento da eficiência agrônômica e econômica.

4.6.3. Aspectos Logísticos e Operacionais do Fornecimento a Granel

A comercialização do adubo orgânico derivado de lodo de ETE em sistema de fornecimento a granel apresenta vantagens operacionais expressivas.

A eliminação do uso de embalagens individuais reduz significativamente os custos de produção e distribuição, além de tornar o processo mais acessível aos produtores e consumidores finais.

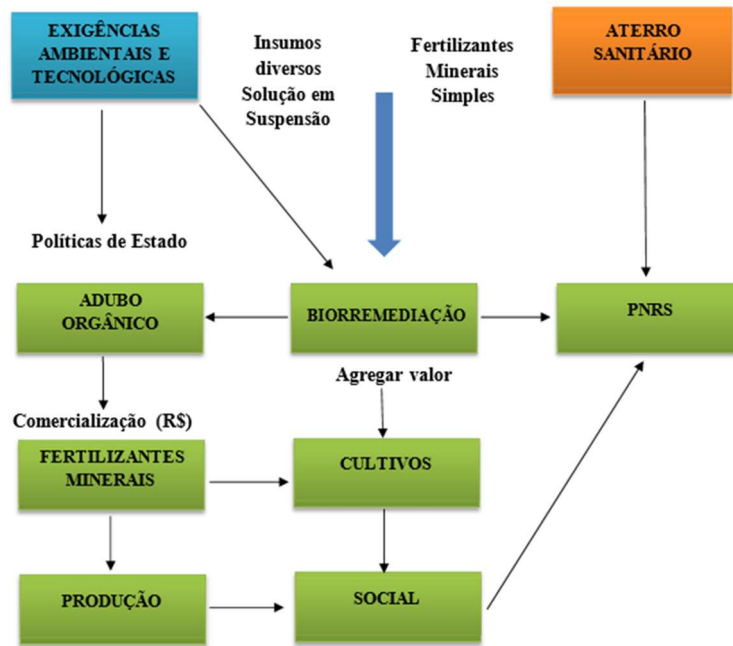
Esse modelo também favorece a aplicação em larga escala, otimizando os processos logísticos de transporte e reduzindo a necessidade de armazenamento intermediário.

A entrega direta do produto aos pontos de uso elimina etapas logísticas desnecessárias e minimiza a geração de resíduos sólidos, reforçando o compromisso com práticas ambientalmente sustentáveis.

4.6.4. Fluxo Logístico e Distribuição do Adubo Orgânico

O fluxo de distribuição do adubo orgânico produzido a partir do lodo de ETE, conforme representado na Figura 11, demonstra a eficácia e a simplicidade do modelo proposto.

Figura 11 - Fluxograma do Processo de Comercialização



Fonte: Autor, 2024.

O processo contempla todas as etapas, desde a produção na unidade de tratamento até a entrega direta aos agricultores, assegurando agilidade na distribuição e atendendo às demandas de forma customizada.

Tal abordagem reduz os investimentos em infraestrutura de armazenamento e embalagem, ao mesmo tempo que permite a adequação do volume de produto às particularidades de cada cultivo.

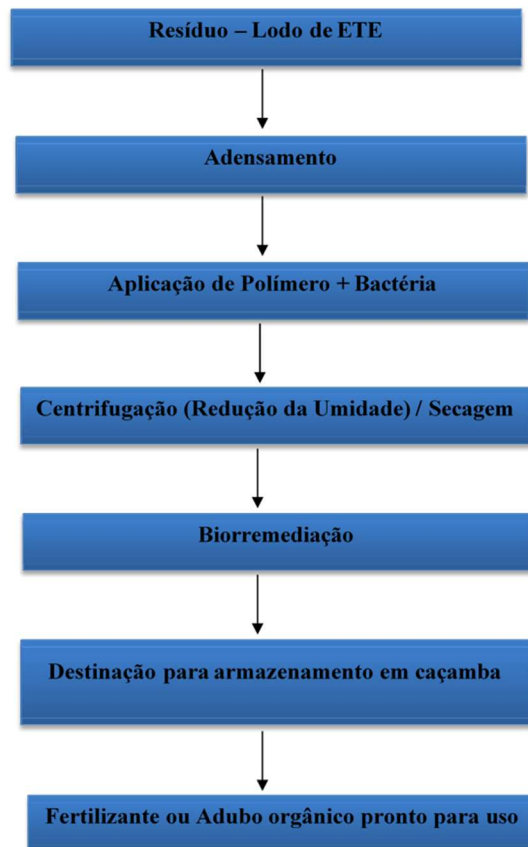
Esse modelo logístico representa uma inovação na gestão de resíduos urbanos e na utilização de insumos na agricultura, promovendo práticas mais econômicas e sustentáveis, adaptadas às necessidades locais.

A normativa de 2020, ao regulamentar o uso agrícola do lodo de ETE, contribui não apenas para o manejo adequado dos resíduos urbanos, mas também para o fortalecimento da área da agricultura, economicamente viável e ambientalmente responsável.

Ao integrar o lodo tratado ao ciclo produtivo agrícola, essa regulamentação transforma um passivo ambiental em um ativo estratégico, promovendo a economia circular e oferecendo soluções eficazes e replicáveis para desafios enfrentados em contextos urbanos e rurais.

A Figura 12 ilustra esse modelo integrado, que pode servir de referência para outras localidades interessadas na adoção de práticas sustentáveis na gestão de resíduos e insumos agrícolas.

Figura 12 - Fluxograma de viabilidade de mercado para o adubo orgânico



Fonte: Autor, 2024.

5. CONCLUSÃO

A caracterização da Estação de Tratamento de Esgoto A, revelou uma infraestrutura moderna e alinhada com os princípios do saneamento ambiental contemporâneo, operando por meio de sistema de lodos ativados em batelada sequencial.

Os dados coletados demonstraram conformidade com os parâmetros físico-químicos e microbiológicos exigidos pela legislação, atestando a eficácia no controle do processo de tratamento de esgoto. Além disso, a instalação de um laboratório microbiológico dentro da

própria estação permitiu avanços no monitoramento do lodo e na rastreabilidade do processo, representando uma medida de aprimoramento técnico-operacional.

No que tange à destinação do lodo da ETE, observou-se que, embora a unidade adote a disposição em aterros sanitários licenciados como prática corrente, essa estratégia representa um custo operacional elevado e se mostra ambientalmente limitada.

A análise indicou que o lodo apresenta potencial para valorização, especialmente por meio da aplicação agrícola, desde que tratados seus aspectos sanitários e legais. O aumento de 33,02% na geração de lodo entre 2022 e 2023, influenciado por variáveis operacionais e climáticas, reforça a necessidade de estratégias alternativas que priorizem a sustentabilidade.

A caracterização através dos parâmetros físico-químicas e bacteriológicas do lodo evidenciou alta carga orgânica e presença significativa de patógenos, como *Escherichia coli* e ovos de helmintos, além de metais como cobre, zinco e bário. Esses resultados reforçam a importância da adoção de tecnologias complementares para garantir a segurança do reaproveitamento agrônomico. A presença de nutrientes e a ausência de características de periculosidade apontam para o potencial uso agrícola do resíduo, desde que submetido a tratamentos eficazes.

Nesse contexto, a aplicação experimental da biotecnologia com *Bacillus subtilis* apresentou-se como uma alternativa promissora. Os testes revelaram que a concentração de 5% do microrganismo, com tempo de incubação de dois dias, foi eficaz na redução de microrganismos indicadores como coliformes totais, *E. coli* e enterococos, sem inibição do efeito bacteriano mesmo na presença de polímeros.

A inoculação da solução bacteriana no tanque de preparo do polímero demonstrou-se a mais prática, eficiente e compatível com a estrutura já existente da ETE, viabilizando sua aplicação sem necessidade de investimentos estruturais adicionais.

A análise do processo de licenciamento evidenciou que a legislação atual, especialmente após a Instrução Normativa nº 61/2020 do MAPA, permite que a prática de biorremediação esteja vinculada à licença de operação da ETE, eliminando a exigência de submissão de projeto específico, desde que a aplicação do fertilizante ocorra em âmbito local. Tal avanço regulamentar facilita a implementação da tecnologia proposta, especialmente para municípios de médio porte, e contribui para a consolidação de práticas ambientalmente responsáveis.

Por fim, a elaboração de proposta de mercado para a destinação do lodo como fertilizante demonstrou viabilidade econômica e logística, com destaque para a distribuição a granel, que atende diretamente às necessidades de pequenos e médios produtores rurais.

A substituição parcial de fertilizantes minerais por insumos orgânicos derivados do lodo tratado oferece ganhos agrônômicos, contribui para a recuperação da fertilidade do solo e reduz os impactos ambientais associados ao descarte convencional.

A estratégia apresentada está em consonância com os princípios da economia circular, promovendo a reintegração de resíduos urbanos ao ciclo produtivo agrícola.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que a aplicação de *Bacillus subtilis* como agente de biorremediação é uma técnica viável, economicamente vantajosa e operacionalmente integrada à realidade das estações de tratamento de esgoto estudadas.

A proposta representa um avanço no manejo sustentável de resíduos e pode ser replicada em diferentes contextos, desde que acompanhada por ações de monitoramento, ajustes normativos e investimento contínuo em inovação e qualificação técnica.

Investimentos contínuos em pesquisa são fundamentais para o aprimoramento e a consolidação dessa tecnologia como uma alternativa segura, eficaz e amplamente replicável nos mais diversos contextos de tratamento de esgoto.

A ampliação das amostragens, a identificação de contaminantes emergentes e a avaliação da eficiência na redução da matéria orgânica são etapas cruciais para garantir sua robustez técnica e sustentabilidade ambiental.

A continuidade de estudos aplicados, com enfoque multidisciplinar e apoio de parcerias institucionais, será determinante para aprofundar o conhecimento sobre os impactos de longo prazo da aplicação agrícola do lodo tratado, além de subsidiar a elaboração de protocolos de monitoramento e a definição de padrões técnicos que possibilitem a padronização e a regulamentação da prática em escala nacional.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. R., et al. (2019). "Efeitos do lodo de ETE na produtividade de culturas agrícolas." *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43, e0190045.

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). Relatório de Gestão 2020. Brasília: ANA, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10.004/2004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13.033/2017: Requisitos para a utilização de lodo de esgoto. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Tratamento de esgotos domésticos: fundamentos e tecnologia. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2009.

ATLAS, R. M. (1981). Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: An Overview. *Microbiological Reviews*, 45(1), 1-52.

BARBOSA, M. F., et al. (2020). "Uso de lodo de ETE em pastagens: benefícios e riscos para a pecuária." *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55(3), 211-220.

BOYER, P. H., & Finlay, B. B. (2016). *Bacillus subtilis* and its biotechnological potential. *Trends in Biotechnology*, 34(3), 253-267.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre a gestão e a destinação de lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. Lei nº 11.445/2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026/2020. Institui o novo marco legal do saneamento básico. Brasília, 2020.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Institui a Política Nacional de Meio Ambiente e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1981.

BRASIL. DECRETO 7404/10 | Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em <http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/dec7404;3901;20120820.pdf>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO LEGISLATIVO Nº 204, de 2004. Aprova o texto da Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes, adotada, naquela cidade, em 22 de maio de 2001. Disponível em <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=3509>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO nº 4.074, de 4 de Janeiro de 2002. Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, que dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4074.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO Nº 4.281, de 25 de junho de 2002. Regulamenta a Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999, que institui a Política Nacional de Educação Ambiental, e dá outras providências. Disponível em <<http://portal.mec.gov.br/secad/arquivos/pdf/educacaoambiental/decreto4281.pdf>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO Nº 5.098, de 3 de Junho de 2004. Dispõe sobre a criação do Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Químicos Perigosos - P2R2, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20042006/2004/Decreto/D5098.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO Nº 5.360 de 31 de Janeiro de 2005. Promulga a Convenção sobre Procedimento de Consentimento Prévio Informado para o Comércio Internacional de Certas Substâncias Químicas e Agrotóxicos Perigosos, adotada em 10 de setembro de 1998, na cidade de Roterdã. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/decreto/d5360.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO Nº 6.514, de 22 de Julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6514.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO Nº 7.405, de 23 de dezembro de 2010. Institui o Programa Pró-Catador, denomina Comitê Interministerial para Inclusão Social e Econômica dos Catadores de Materiais Reutilizáveis e Recicláveis o Comitê Interministerial da Inclusão Social de Catadores de Lixo criado pelo Decreto de 11 de setembro de 2003, dispõe sobre

sua organização e funcionamento, e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20072010/2010/Decreto/D7405.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. DECRETO nº 875, de 19 de julho de 1993. Promulga o texto da Convenção sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D0875.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. LEI Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. LEI Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%20%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias.>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. LEI Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, Disponível em < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>. Acesso em 03 de dez. de 2023.

BRASIL. LEI nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União, 2020.

BRASIL. LEI Nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em 03 de dez. 2020.

BRASIL. LEI Nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7802.htm> Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. LEI Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9605.htm>.

Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. LEI Nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19795.htm>. Acesso em 03 de dez. 2023. PL 203/1991.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 235, de 7 de janeiro de 1998. Altera a Resolução no 23/96 (altera o anexo 10) em cumprimento ao disposto no art. 8º da Resolução no 23/96 Altera o anexo 10. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=235>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 275, de 25 de Abril 2001. Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva. Disponível em <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=291>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 308, de 21 de março de 2002. Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte. Disponível em <https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/46_12112008111942.pdf>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 313, de 29 de outubro de 2002. Revoga a Resolução CONAMA no 6/88 Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em <https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3752-006_103464.html#:~:text=Define%20crit%C3%A9rios%20e%20procedimentos%2C%20para,derivados%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias.>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 380, de 31 de outubro de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=514>>. Acesso em 03 de

dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 5, de 5 de agosto de 1993. Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos gerados nos portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários e estabelecimentos prestadores de serviços de saúde. (Revogadas as disposições que tratam de resíduos sólidos oriundos de serviços de saúde pela Resolução nº 358/05. Disponível em <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=6B83C8B8B8CB6F9144FE5D273130FA3E9.proposicoesWebExterno2?codteor=158142&filename=LegislacaoCitada+-PL+1787/2003>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA Nº 8, de 19 de setembro de 1991. Dispõe sobre a vedação da entrada no país de materiais residuais destinados à disposição final e incineração no Brasil. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=122>>. Acesso em 03 de dez. 2020.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 357/2005. Estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes em corpos d'água. Brasília, 2005.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Estabelece as diretrizes para o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, 1997.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 369, de 30 de março de 2006. Trata da disposição e aproveitamento de resíduos. Diário Oficial da União, Brasília, 2006.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Diretrizes para o manejo de resíduos sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 2006.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 23, de 12 de dezembro de 1996. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res96/res2396.html>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão de resíduos da construção civil. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

BARROS, F. F. C. et al. Production of enzymes from agroindustrial wastes by biosurfactant-producing strains of *Bacillus subtilis*. *Biotechnology Research International*, v. 2013, p. 1–8, 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3600294/>. Acesso em 29 de mai. 2025.

CARDOSO, J. F., et al. (2023). "Impactos do uso de lodo de esgoto no reflorestamento: análise dos efeitos na biodiversidade." *Revista de Ecologia Aplicada*, 34(2), 145-157.

CAVALCANTE, A. L.; et al. Bioremediação e tratamentos de águas residuais com lodo de ETE. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 24, n. 3, p. 45-58, 2020.

CHRISTENSEN, T. H. et al. Bioremediation of sewage sludge: Challenges and potential. *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 5, p. 3071-3081, 2018.

DEGEN, T. et al. Digestão anaeróbica de lodo de esgoto: avanços e perspectivas. 2. ed. São Paulo: Editora Ambiental, 2018. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=335>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

DUFRESNE, M., He, X., & Jacques, M. (2014). Biological control of plant diseases by *Bacillus subtilis*: a review. *Journal of Applied Microbiology*, 117(4), 1334-1344.

EATON, Andrew D., Lawrence S. Clesceri, Eugene W. Rice, and Richard Baird, eds. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

GÄNZLE, M. G., & Vermeulen, N. (2016). Bioactive compounds from *Bacillus subtilis*. *Food Research International*, 89, 42-49.

GIBSON, D. T., et al. (2000). Bacterial Degradation of Aromatic Compounds. *Annual Review of Microbiology*, 54, 219-240.

GOGOI, B. K., et al. (2014). *Biorremediação: Princípios, Aplicações e Perspectivas*. Springer.

GÓMEZ, M. et al. "Efeitos Ambientais da Poluição por Esgoto Não Tratado." *Journal of Environmental Sciences*, vol. 34, no. 2, 2018, pp. 88-102.

GÓMEZ, S. et al. Uso do lodo de ETE na construção civil. *Revista de Engenharia e Construção*, v. 22, n. 1, p. 77-85, 2018.

GONÇALVES, L. R., et al. (2021). "Riscos à saúde animal pelo uso de lodo de ETE em pastagem." *Revista Brasileira de Pecuária Sustentável*, 27(1), 58-65.

GUPTA, S.; CHAND, S. Bioremediation of sewage sludge: A sustainable approach. *Environmental Technology & Innovation*, v. 20, p. 101070, 2020. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101070.

HIKIMATE Abriouel, Charles M.A.P. Franz, Nabil Ben Omar, Antonio Gálvez, Diversity and applications of *Bacillus bacteriocins*, *FEMS Microbiology Reviews*, Volume 35, Issue 1, January 2011, Pages 201–232. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00244.x> >. Acesso em 29 de mai. 2025.

HUANG, H., Wang, L., & Li, L. (2015). Enzyme production by *Bacillus subtilis*: applications in industrial biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(11), 4987-4996.

INSTITUTO TRATA BRASIL. *Diagnóstico do Saneamento Básico no Brasil 2020*. São Paulo, 2020.

INSTITUTO TRATA BRASIL. *Ranking do Saneamento 2020*. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2020.

JAYARAMAN, S., Rajendran, L., & Manoharan, P. T. (2017). *Bacillus subtilis* as a plant growth promoter: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 36-48.

JENSEN, M. et al. Lodo de ETE como fertilizante agrícola: benefícios e riscos. *Environmental Science & Technology*, v. 51, p. 10435-10442, 2017.

JUNG, J. S. et al. Simultaneous production of amylases and proteases by *Bacillus subtilis* in brewery wastes. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 26, n. 11, p. 1855–1862, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27266628/>. Acesso em 29 de mai. 2025.

KUMAR, M. et al. Potential of sewage sludge as a biofertilizer in sustainable agriculture. *Environmental Sustainability*, v. 12, n. 2, p. 35-42, 2020.

LIMA, G. et al. O uso do lodo de ETE no concreto e cerâmica. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 28, n. 2, p. 92-105, 2020.

LIMA, B. C.; et al. Valorização de lodo de esgoto anaeróbico digerido de estação de tratamento descentralizada por meio da compostagem. *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v. 12, n. 1, p. 120–135, abr. 2019. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.1.61489.

LIMA, R. et al. Challenges in the bioremediation of sewage sludge: New insights and developments. *Environmental Research*, v. 193, p. 110439, 2022.

MA, X. et al. Microbial treatment of sludge from wastewater treatment plants: Mechanisms and applications. *Journal of Environmental Management*, v. 291, p. 112739, 2021.

MENDONÇA, A. F., et al. (2022). "Alterações ecológicas causadas pela aplicação de lodo de esgoto em áreas de reflorestamento." *Ecologia e Conservação*, 19(2), 101-112.

METCALF, L.; EDDY, H. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, 2016.

MIELICH-SÜSS, B.; LOPEZ, D. Molecular mechanisms involved in *Bacillus subtilis* biofilm formation. *Environmental Microbiology*, v. 17, n. 3, p. 555–565, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12527>. Acesso em 29 de mai. 2025.

MÜLLER, J. et al. A compostagem de lodo de ETE: benefícios para a agricultura. *Compost Science & Utilization*, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2021. Acesso em 29 de mai. 2025.

MULLIGAN, C. N., et al. (2001). Remediação de Solos e Águas Poluídas: Biorremediação. *Journal of Environmental Quality*, 30(6), 2081-2094.

OLIVEIRA, M. R.; SILVA, D. G. *Microbiologia Ambiental e Biodegradação*. 2. ed. São Paulo: Editora Universitária, 2021.

ONGENA, M., & Jacques, P. (2008). *Bacillus subtilis* as a biological control agent: mechanisms and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 737-753.

PAREDES FILHO, Mário Viana. Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola. *Revista Agrogeoambiental*, v. 3, n. 3, p. 113-120, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v3n32011364>. Acesso em 29 de mai. 2025.

PINTO, A. et al. "Doenças Transmitidas por Água e a Importância do Tratamento de Efluentes." Revista de Saúde Pública, vol. 51, no. 6, 2019, pp. 72-86. Portaria Interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. Disponível em < <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-interministerial-n%C2%BA-274-de-30-de-abril-de-2019-86235505>>. Acesso em 03 de dez. 2023.

RAO, K. S. et al. Bacillus subtilis-mediated bioremediation of sewage sludge: Current trends and future perspectives. Environmental Pollution, v. 285, p. 117467, 2022.

RASKIN, I., et al. (1994). Acúmulo de Metais Tóxicos por Plantas Aquáticas: Uma Revisão. Environmental Science & Technology, 28(5), 361-371.

ROCCO, Débora H. E. et al. Bacillus subtilis as an effective tool for bioremediation of lead, copper and cadmium in water. Discover Applied Sciences, 2024.

SALMAZO, Paulo et al. Evaluation of Bacillus subtilis as a tool for biodegrading diesel oil and gasoline in experimentally contaminated water and soil. 2024.

SANTOS, M. et al. Uso de lodo de ETE na produção de biogás e compostagem. Environmental Biotechnology, v. 38, p. 101-112, 2021.

SANTOS, R. D. Gestão e tratamento de resíduos de estações de tratamento de esgoto. São Paulo: Ed. Ambiental, 2018.

SANTOS, R. et al. Impactos do uso de lodo de ETE na construção civil. Journal of Sustainable Construction, v. 36, n. 2, p. 23-30, 2020.

SHARMA, S. K., Singh, P., & Kumar, P. (2017). Biofertilizers from Bacillus subtilis for sustainable agriculture. Environmental Sustainability, 21(6), 1259-1273.

SILVA, L. et al. Recuperação de metais pesados do lodo de ETE: alternativas e desafios. Environmental Technology & Innovation, v. 19, p. 50-61, 2021.

SILVA, Philippe Solano Toledo. *Microorganismos e lodo de esgoto compostado no desenvolvimento inicial de mudas de baru em vasos*. 2021. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Botucatu, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/192d8ff7-792f-4c25-8fc8-4c72c6ac22d1>. Acesso em 29 de mai. 2025.

SINGH, B. K. (2006). Pesticidas no Ambiente: Biorremediação de Áreas Contaminadas por Pesticidas. Em: Microbial Biodegradation and Bioremediation. Elsevier.

SINGH, R. P., Sharma, M., & Sharma, V. (2016). Biotechnological applications of Bacillus subtilis: A review. Biochemical Engineering Journal, 104, 212-229.

SONG, Y.; Zhou, Y.; Pan, Y. Discovery and Characterization of a Novel Bacteriocin That Strongly Inhibits Staphylococcus aureus. Fermentation 2024, 10, 355. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fermentation10070355>. Acesso em 29 de mai. 2025.

TAVARES, F. G., et al. (2020). "O uso do lodo de esgoto como fertilizante: benefícios e limitações." Revista de Agricultura Sustentável, 13(4), 95-104.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

VIDALI, M. (2001). Biorremediação: Uma Visão Geral. Pure and Applied Chemistry, 73(7), 1163-1172.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. Lodos em estações de tratamento de esgotos: geração, características, tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

WANG, C. et al. Uso de lodo de ETE para remediação de solos contaminados. Environmental Pollution, v. 252, p. 261-270, 2020.

WHO. Water, Sanitation and Health: Progress Report 2018. World Health Organization, 2018.

ZHANG, Y. et al. Advances in the application of Bacillus subtilis in bioremediation of wastewater sludge. Journal of Hazardous Materials, v. 419, p. 126405, 2021.

ZHAO, Z. et al. Aplicações de lodo de ETE em recuperação ambiental. Environmental Management Review, v. 27, n. 6, p. 453-467, 2019.

ZHU, Y., Chen, W., & Yu, Z. (2014). Genetic manipulation of Bacillus subtilis for industrial applications. Biotechnology Advances, 32(6), 1229-1239.

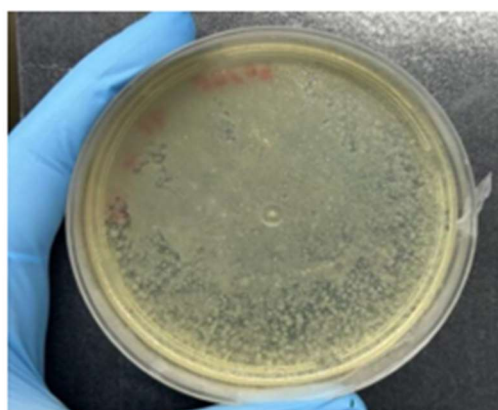
ANEXO A – FOTOS DOS PRIMEIROS ENSAIOS DE ESTUDO QUE FORAM EXECUTADOS COM SUBSTRATO, BAGAÇO E BACILOS

Tratamento A 3/4c D1

Amostra A – Substrato 1 g – dia 1



Amostra A – Substrato 1 g – dia 1



Tratamento B 3/10 D1

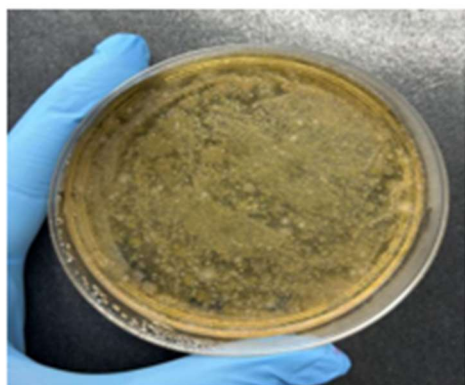
Amostra B – Bagaço 1 g – dia 1



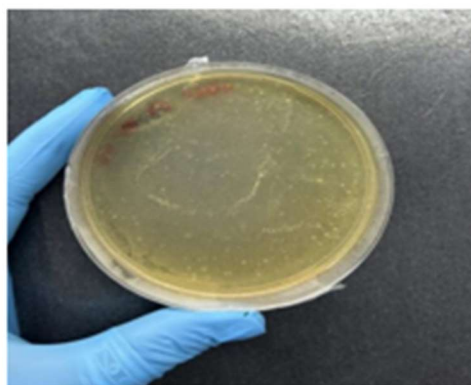
Amostra B – Bagaço 1 g – dia 7



Amostra A+B - 1 g - dia 1



Amostra A+B - 1 g - dia 7



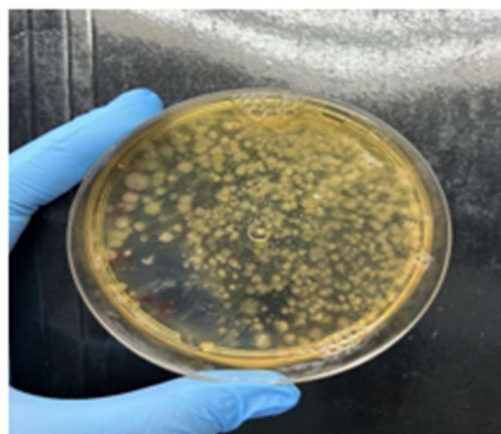
Amostra C - Bacilos - 10mL - dia 1



Amostra C - Bacilos - 10mL - dia 7



Amostra D - Bacilos - 1 mL - dia 1



Amostra D - Bacilos - 1 mL - dia 7



ANEXO B – TABELAS DE RESULTADOS

Tabela 7 - Resultados da coleta de 30 de maio de 2024

Data	Identificação	Dias	Concentração	E-coli (UFC/ml)	Coliformes totais (UFC/ml)	Bac. Heterotrófica (UFC/ml)	Enterococcus (UFC/ml)
30/05/2024	BRANCO A	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO B	1	01:10	3	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO C	1	01:10	1	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%A	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%B	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%C	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%A	1	01:10	13	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%B	1	01:10	5	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%C	1	01:10	33	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%A	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%B	1	01:10	5	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%C	1	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO A	2	01:10	2	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO B	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO C	2	01:10	1	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%A	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%B	2	01:10	4	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%C	2	01:10	3	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%A	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%B	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%C	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%A	2	01:10	10	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%B	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%C	2	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO A	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO B	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO C	7	01:10	4	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%A	7	01:10	3	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%B	7	01:10	10	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%C	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%A	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%B	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%C	7	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%A	7	01:10	4	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%B	7	01:10	7	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%C	7	01:10	5	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO A	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO B	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	BRANCO C	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%A	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%B	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	5%C	14	01:10	1	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%A	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%B	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	10%C	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%A	14	01:10	7	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%B	14	01:10	7	Incontável	Incontável	Incontável
30/05/2024	20%C	14	01:10	0	Incontável	Incontável	Incontável

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 8 - Resultados da coleta de 28 de junho de 2024

Data	Identificação	Dias	Concentração	E-coli (UFC/ml)	Coliformes totais (UFC/ml)	Bac. Heterotrófica (UFC/ml)	Enterococcus (UFC/ml)
11/06/2024	BRANCO A	1	01:10	10	6450	12000	20
11/06/2024	BRANCO B	1	01:10	20	5250	22000	10
11/06/2024	BRANCO C	1	01:10	0	2000	7000	10
11/06/2024	5%1	1	01:10	10	1000	12500	10
11/06/2024	5%2	1	01:10	30	1250	INCONTAVEL	20
11/06/2024	5%3	1	01:10	20	1250	13750	10
11/06/2024	10%1	1	01:10	0	1250	20000	20
11/06/2024	10%2	1	01:10	20	1250	19750	10
11/06/2024	10%3	1	01:10	0	750	10000	0
11/06/2024	20%1	1	01:10	0	750	4750	50
11/06/2024	20%2	1	01:10	0	2500	INCONTAVEL	10
11/06/2024	20%3	1	01:10	0	300	INCONTAVEL	20
11/06/2024	BRANCO A	2	01:10	20	3000	12250	250
11/06/2024	BRANCO B	2	01:10	30	1100	11000	40
11/06/2024	BRANCO C	2	01:10	0	750	4050	40
11/06/2024	5%1	2	01:10	0	4500	11000	10
11/06/2024	5%2	2	01:10	0	300	17000	0
11/06/2024	5%3	2	01:10	0	INCONTAVEL	INCONTAVEL	10
11/06/2024	10%1	2	01:10	0	INCONTAVEL	INCONTAVEL	190
11/06/2024	10%2	2	01:10	0	2000	10250	280
11/06/2024	10%3	2	01:10	0	6250	17500	90
11/06/2024	20%1	2	01:10	INCONTAVEL	INCONTAVEL	INCONTAVEL	INCONTAVEL
11/06/2024	20%2	2	01:10	INCONTAVEL	INCONTAVEL	INCONTAVEL	INCONTAVEL
11/06/2024	20%3	2	01:10	INCONTAVEL	INCONTAVEL	INCONTAVEL	40
11/06/2024	BRANCO A	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	10
11/06/2024	BRANCO B	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	20
11/06/2024	BRANCO C	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	40
11/06/2024	5%1	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	5%2	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	30
11/06/2024	5%3	7	01:10	0	0	750	0
11/06/2024	10%1	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	10%2	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	50
11/06/2024	10%3	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	30
11/06/2024	20%1	7	01:10	0	0	2000	0
11/06/2024	20%2	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	20%3	7	01:10	0	0	INCONTAVEL	30
11/06/2024	BRANCO A	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	30
11/06/2024	BRANCO B	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	100
11/06/2024	BRANCO C	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	10
11/06/2024	5%1	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	5%2	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	INCONTAVEL
11/06/2024	5%3	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	INCONTAVEL
11/06/2024	10%1	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	10%2	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	20
11/06/2024	10%3	14	01:10	0	0	1000	40
11/06/2024	20%1	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	INCONTAVEL
11/06/2024	20%2	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	0
11/06/2024	20%3	14	01:10	0	0	INCONTAVEL	0

Fonte: Autor, 2024.