

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JULIA MARIA DOS SANTOS SILVA
THAISSA ISABELLE DOS SANTOS

Geração e alternativas de destinação final para lodo de esgoto: estudo de caso
com municípios selecionados das UGRHIs 5 e 13

São Carlos
2023

JULIA MARIA DOS SANTOS SILVA
THAISSA ISABELLE DOS SANTOS

Geração e alternativas de destinação final para lodo de esgoto: estudo de caso
com municípios selecionados das UGRHIs 5 e 13

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Ambiental, da Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Schalch

São Carlos

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

Silva, Julia Maria dos Santos
S586g Geração e alternativas de destinação final para lodo de
esgoto : estudo de caso com municípios selecionados das
UGRHIs 5 e 13 / Julia Maria dos Santos Silva, Thaissa
Isabelle dos Santos; orientador Valdir Schalch. -- São
Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Lodo residual biológico.
2. Resíduos de serviços públicos de saneamento básico.
3. Esgotos.
4. Aterros sanitários.

I. Santos, Thaissa Isabelle dos. II. Título

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Julia Maria dos Santos Silva e Thaissa Isabelle dos Santos**

Data da Defesa: 06/07/2023

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Valdir Schalch (Orientador(a))

APROVADO

Igor Matheus Benites

APROVADO

prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba

APROVADO



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

DEDICATÓRIA

*Dedicamos esse trabalho uma à outra,
pela amizade, compreensão e parceria
vivenciadas ao longo de todos os anos da
graduação*

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais e família, por nos darem amor e as demais condições que tornaram possíveis a realização do sonho de graduar na melhor Universidade da América Latina.

A todos que constroem o Centro Acadêmico Armando de Salles Oliveira (CAASO) e a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP), por fornecerem os recursos necessários a uma sólida formação profissional, nos termos de pesquisa, ensino, extensão e políticas de permanência estudantil.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS), por todos os ensinamentos de formação acadêmica e, também, cidadã. Em especial ao professor Valdir Schalch, pela orientação no presente trabalho.

A todos os nossos amigos, por dividirem os bons e difíceis momentos, fazendo com que essa jornada fique para sempre registrada em nossas memórias e corações.

RESUMO

SILVA, J.M.S. SANTOS, T.I. Geração e alternativas de destinação final para lodo de esgoto: estudo de caso com municípios selecionados das UGRHIs 5 e 13. 2023. 96 f.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

O crescimento populacional acelerado apresenta grandes desafios socioambientais, como o aquecimento global, a degradação dos solos, a perda da biodiversidade, a falta de saneamento básico e a má gestão dos resíduos sólidos. No Brasil, aproximadamente 55,8% da população possui acesso a redes de esgoto, de acordo com o SNIS. No entanto, a destinação final adequada do lodo residual biológico proveniente do tratamento de esgoto é um desafio devido ao seu potencial poluidor. O SINIR relata que, em 2020, foram geradas 113.953,81 toneladas de resíduos de serviços públicos de saneamento básico no país, sendo que 80% foram dispostos em aterros sanitários. Nesse contexto, é necessário adotar tecnologias adequadas para o tratamento e a destinação final do lodo de esgoto, visando reduzir o impacto ambiental e promover a economia circular. Dentre as alternativas possíveis, destacam-se a produção de biogás, a obtenção de biofertilizantes por meio de compostagem e a produção de materiais de construção a partir dos resíduos semissólidos.

Para entender a geração e a destinação do lodo residual biológico nos processos de tratamento de esgoto, realizou-se revisão da literatura, onde constata-se que os sistemas aeróbios tendem a gerar mais lodo do que os processos anaeróbios, além da utilização de dados de planos municipais de saneamento básico e gestão de resíduos sólidos para os municípios do estudo de caso: São Carlos e Araraquara, pertencentes à UGRHI 13, e Jundiaí e Piracicaba, pertencentes à UGRHI 5. Em Araraquara e São Carlos, as estações de tratamento de esgoto utilizam sistemas diferentes: lagoa de aeração seguida de lagoa de sedimentação em Araraquara, e reator UASB em São Carlos, ambos os municípios dispõe o lodo no aterro sanitário CGR Guatapará. Em Jundiaí e Piracicaba, são empregados tratamentos semelhantes, com lagoa de aeração seguida de lagoa de decantação. Jundiaí destina o resíduo para compostagem enquanto Piracicaba dispõe em aterro sanitário, no entanto, Piracicaba possui um projeto em andamento para também realizar compostagem do lodo.

Os planos municipais e as empresas de saneamento foram fontes importantes de dados, embora tenham sido encontradas algumas divergências nos volumes de geração apresentados. A redução do volume de lodo gerado e a busca por destinações finais adequadas estão alinhadas

com os objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Portanto, estudos de viabilidade devem ser realizados para explorar o reaproveitamento do lodo de esgoto, considerando, especialmente, o expressivo volume de geração desse resíduo, a dificuldade no seu tratamento e seus impactos socioambientais.

Palavras-chave: Lodo residual biológico. Resíduos de serviços públicos de saneamento básico. Esgotos. Aterros sanitários.

ABSTRACT

SILVA, J.M.S. SANTOS, T.I. **Generation and destination alternatives for sewage sludge: case study with selected municipalities of UGRHIs 5 and 13.** 2023. 96 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

Accelerated population growth presents major socio-environmental challenges, such as global warming, soil degradation, loss of biodiversity, lack of basic sanitation and poor solid waste management. In Brazil, approximately 55.8% of the population has access to sewage networks, according to the SNIS. However, the proper final disposal of biological sludge from sewage treatment is a challenge due to its polluting potential. SINIR reports that in 2020, 113,953.81 tons of waste from public sanitation services were generated in the country, 80% of which were disposed of in landfills. In this context, it is necessary to adopt appropriate technologies for the treatment and final disposal of sewage sludge, in order to reduce the environmental impact and promote the circular economy. Among the possible alternatives, is highlighted the production of biogas, the obtaining of biofertilizers through composting and the production of construction materials from semi-solid waste.

To understand the generation and destination of biological sludge in sewage treatment processes, a literature review was conducted, which found that aerobic systems tend to generate more sludge than anaerobic processes, in addition to the use of data from municipal plans for basic sanitation and solid waste management for the municipalities of the case study: São Carlos and Araraquara, belonging to UGRHI 13, and Jundiaí and Piracicaba, belonging to UGRHI 5. In Araraquara and São Carlos, the sewage treatment plants use different systems: aeration pond followed by sedimentation pond in Araraquara, and UASB reactor in São Carlos, both cities dispose of the sludge in the CGR Guatapará landfill. In Jundiaí and Piracicaba, similar treatments are used, with aeration pond followed by settling pond. Jundiaí disposes of the waste for composting while Piracicaba has it in a landfill, however, Piracicaba has a project in progress to also perform composting of the sludge.

Municipal plans and sanitation companies were important sources of data, although some divergences were found in the sludge generation volumes presented. The reduction of the volume of sludge generated and the search for appropriate final destinations are aligned with the objectives of the National Solid Waste Policy. Therefore, feasibility studies should be

carried out to explore the reuse of sewage sludge, especially considering the significant volume of generation of this waste, the difficulty in its treatment and its socio-environmental impacts.

Keywords: Biological sludge. Public sanitation service waste. Sewage. Sanitary landfills.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação de resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade	24
Figura 2 – Esquema de Grade e Desarenador	29
Figura 3 – Decantador Tratamento Primário	30
Figura 4 – Compartimentos da lagoa facultativa	33
Figura 5 – Processo de incineração de resíduos	45
Figura 6 – Processo de avaliação de impacto ambiental	47
Figura 7 – Relação causa e efeito	48
Figura 8 – Regiões hidrográficas e UGRHIs do Estado de São Paulo	50
Figura 9 – Divisão por municípios da UGRHI 13, com destaque para Araraquara e São Carlos	51
Figura 10 – Divisão por municípios da UGRHI 5	52
Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada	54
Figura 12 – Vista aérea da ETE Araraquara	56
Figura 13 – Lançamento no corpo receptor realizado pela ETE Araraquara	57
Figura 14 – Sistema de tratamento preliminar ETE Araraquara: a) gradeamento, b) desarenador, c) peneiras	58
Figura 15 – Sistema de tratamento secundário ETE Araraquara: a) lagoa de aeração, b) lagoa de sedimentação	59
Figura 16 – Localização das ETEs de São Carlos – SP	61
Figura 17 – Vista aérea da ETE Monjolinho	62
Figura 18 – Etapas de tratamento da ETE Monjolinho	64
Figura 19 – Localização das principais ETEs e EEEs de Jundiaí	66
Figura 20 – Vista aérea da ETE Jundiaí	67
Figura 21 – Vista aérea da ETE Bela Vista	69
Figura 22 – Tratamento do lodo biológico da ETE Araraquara	71
Figura 23 – Sistema de desaguamento e secagem térmica do lodo ETE Araraquara	72
Figura 24 – Aterro CGR Guatapará	75
Figura 25 – Fluxograma do sistema de desidratação do lodo da ETE Jundiaí	76
Figura 26 – Galpão de compostagem	77
Figura 27 – Fluxograma simplificado da rede causa-efeito	80
Figura 28 – Variáveis de interesse e fatores causais da rede causa-efeito	81

Figura 29 – Fatores causais e condições iniciais da rede causa-efeito	81
Figura 30 – Condições iniciais, efeitos e impactos da rede causa-efeito.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Destinação de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico gerados em ETEs 2019/2020	26
Tabela 2 – Características e quantidade de lodo produzido em lagoas de estabilização	34
Tabela 3 – Características e quantidade de lodo produzido em sistemas de lodos ativados	36
Tabela 4 – Principais características dos filtros biológicos percoladores.....	37
Tabela 5 – Características e quantidade de lodo produzido em filtros biológicos	38
Tabela 6 – Características e quantidade de lodo produzido em reator UASB.....	40
Tabela 7 – Unidades previstas nos dois módulos iniciais de tratamento.....	57
Tabela 8 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Araraquara	60
Tabela 9 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Monjolinho	63
Tabela 10 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Jundiaí.....	68
Tabela 11 – Vazões previstas de esgoto afluente à bacia de esgotamento Bela Vista	70
Tabela 12 – Resumo da gestão de resíduos de serviços públicos de saneamento básico de Araraquara	73
Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos	707

LISTA DE ABREVIATURA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA – Avaliação de Impactos Ambientais
ANA - Agência Nacional de Águas
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAAE - Departamento Autônomo de Água e Esgoto do município de Araraquara
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
EIA – Estudo de Impacto Ambiental
ETA – Estação de Tratamento de Água
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
ETEJ - Estação de Tratamento de Esgoto Jundiaí
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQA - Índice de Qualidade das Águas
MMA – Ministério do Meio Ambiente
NBR – Norma Brasileira
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS – Organização Mundial da Saúde
ONU – Organização das Nações Unidas
PCJ - Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos
PMSB – Plano Municipal de Resíduos Sólidos
PMGIRS – Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
RIMA – Relatório de Impacto Ambiental
SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos
SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
TRS – Tempo de Retenção de Sólidos
UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)

WTE – Waste to energy (Reaproveitamento energético)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivos específicos	19
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1. Definições de importância do trabalho	20
3.2. Justificativa para abordagem selecionada.....	24
3.3. Processos de tratamento de esgoto e resíduos gerados.....	27
3.3.1. Tratamento preliminar	28
3.3.2. Tratamento primário	29
3.3.3. Tratamento secundário.....	30
3.3.4. Tratamento terciário.....	31
3.4. Formação de lodo por tipos de tratamento biológico	32
3.4.1. Lagoas de estabilização	32
3.4.2. Lodos ativados.....	34
3.4.3. Filtros	36
3.4.4. Reator UASB	38
3.5. Processos de tratamento de lodo.....	40
3.6. Destinação final de lodo.....	42
3.7. Avaliação dos impactos de resíduos de serviços públicos de saneamento básico	46
4. METODOLOGIA.....	49
4.1. Caracterização do local de estudo.....	49
4.1.2. Caracterização dos municípios	53
4.2. Métodos aplicados aos objetivos	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1. Tratamento de esgoto adotado	55
5.1.1. UGRHI 13.....	55
5.1.2. UGRHI 5.....	64
5.2. Geração, tratamento e destinação final do lodo	70
5.2.1. UGRHI 13.....	70
5.2.2. UGRHI 5.....	76

5.3. Avaliação de impacto da destinação final do lodo.....	79
6. CONCLUSÃO.....	84
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa trazer contribuições de redução de impacto socioambiental nas esferas de esgotamento sanitário e manejo de resíduos sólidos, a partir da quantificação da geração de resíduos de serviços públicos de saneamento básico, mais especificamente do lodo residual biológico, em relação aos diferentes tipos de tratamento de esgoto adotados, assim como a avaliação das destinações finais convencionalmente utilizadas e possíveis alternativas de reaproveitamento.

O significativo crescimento populacional reflete em uma série de questões socioambientais, por isso temáticas como aquecimento global, degradação dos solos agricultáveis, perda de biodiversidade, ausência de saneamento básico e destinação de resíduos sólidos, são de extrema importância para a humanidade. Consequentemente, o meio ambiente é incluído nas pautas das reuniões realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), as problemáticas ambientais transcendem fronteiras territoriais, afetando a todo o planeta, o que exige uma abordagem global para suas tratativas (FIOCRUZ, 2018).

O saneamento básico, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), é o controle dos fatores ambientais que podem ser nocivos ao bem-estar físico, mental e social dos indivíduos (CABEDO JUNIOR *et al.*, 2018). No Brasil, acesso ao saneamento básico é um direito já previsto na Constituição Federal de 1988, pois é necessário a dignidade humana, inclusão social e preservação dos recursos naturais, ou seja, é essencial à vida humana e ao meio ambiente (RIGOLIN, 2022). Além disso, a Lei nº11.445/2007, atualizada pela Lei nº14.026/2020, estabelece as diretrizes para o saneamento básico, assim como a Lei nº 12.305/2010, institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), apoiando na gestão dos temas a nível nacional.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em seu levantamento de 2021, apresenta que do total da população brasileira, aproximadamente 213 milhões de pessoas, 55,8% possuem atendimento de rede de esgoto. O descarte do lodo é um problema para os municípios devido ao potencial poluidor das substâncias presentes nesse resíduo (RIGOLIN, 2022). Dados do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) declaram que em 2020 foram geradas 113.953,81 toneladas de resíduos de serviços públicos de saneamento básico de estações de tratamento de esgotos (ETE), sendo 64% destinada a aterros sanitários, 12% a lixões ou aterros controlados e 24% a tratamentos não

especificados. Desses, 33.139,06 toneladas são do estado de São Paulo, onde aproximadamente 80% é destinado a aterros sanitários e os outros 20% a tratamento.

Para Metcalf e Eddy (2016), o esgoto consiste na água de abastecimento de uma comunidade após seu uso, sendo necessário tratamento, devido à presença de constituintes problemáticos à saúde pública e ao meio ambiente. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma NBR 12.209 de 1989, estabelece as condições necessárias para a elaboração de projetos hidráulicos-sanitários de ETEs, cujo propósito é reduzir as cargas poluidoras do esgoto sanitário e tratar adequadamente a matéria residual resultante desse processo (ABNT, 1989). O tratamento de esgoto gera não apenas o lodo residual nos processos primários, secundários e terciários, mas também resíduos sólidos provenientes do tratamento preliminar, como os sólidos grosseiros retidos em gradeamentos e a areia coletada dos desarenadores (PEDROZA *et al.*, 2010).

Segundo André França, secretário de Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente, os “lixões” e aterros controlados são muito parecidos, uma vez que não possuem garantia de adequação ambiental, portanto são destinações irregulares. Por outro lado, os aterros sanitários são obras de engenharia preparadas para proteção ambiental dos contaminantes gerados nos processos de decomposição. Os locais irregulares são ilegais e passam por processo de desativação, mas mesmo em locais adequados é importante levar em consideração suas capacidades máximas. O desafio atual é a gestão de resíduos sólidos para se enviar aos aterros sanitários o mínimo possível, apenas o que não é passível de reaproveitamento e/ou reciclagem (MMA, 2023).

Dessa forma, baseando-se nos instrumentos de política das Leis nº14.026/2020 e nº 12.305/2010, como o Plano de Saneamento Básico (PSB) e Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), além de outras referências de literatura, foi realizado um estudo de caso em quatro municípios localizados no estado de São Paulo, pertencentes a duas UGRHIS distintas: a UGRHI 13 Tietê-Jacaré e a UGRHI 5 Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), avaliando-se os sistemas de tratamento de esgoto, a produção de lodo e seu respectivo tratamento e destinação final.

2. OBJETIVOS

Realizar comparação da geração de lodo por tipos de tratamento de esgoto com foco nos impactos ambientais da destinação final por meio de estudo de caso.

2.1. Objetivos específicos

- Comparação da geração de lodo por processos de tratamento de esgoto;
- Comparação da eficiência dos processos de tratamento do lodo produzido e seu respectivo volume enviado à destinação final;
- Avaliação da geração de lodo nas ETEs selecionadas das UGRHIs (São Carlos e Araraquara - UGRHI 13 e Jundiaí e Piracicaba - UGRHI 5);
- Avaliação dos impactos socioambientais das destinações para o lodo residual biológico;
- Avaliação de soluções convencionais e não convencionais de pós tratamento de lodo e alternativas de reaproveitamento energético.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura busca introduzir as definições e temáticas que são pertinentes para a justificativa da abordagem selecionada no trabalho, assim como suas etapas: quantificação da geração de lodo residual biológico em diferentes sistemas de tratamento de esgoto e avaliação das destinações finais. O item 3.1 inicia com as definições de importância, o 3.2 justifica o estudo, seguido pelos demais subtópicos que focam nos processos de tratamento de esgoto, lodo (geração por tipo de processo, tratamentos e destinações finais empregadas) e avaliação de impacto.

3.1. Definições de importância do trabalho

A Lei Federal nº14.026/2020, atualiza o marco legal do saneamento básico, instituído pela Lei nº11.445 de 2007. Nela, define-se como saneamento básico:

“conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de: a) abastecimento de água potável: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e seus instrumentos de medição; b) esgotamento sanitário: constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias à coleta, ao transporte, ao tratamento e à disposição final adequados dos esgotos sanitários, desde as ligações prediais até sua destinação final para produção de água de reúso ou seu lançamento de forma adequada no meio ambiente; c) limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos: constituídos pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana; e d) drenagem e manejo das águas pluviais urbanas: constituídos pelas atividades, pela infraestrutura e pelas instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas, contempladas a limpeza e a fiscalização preventiva das redes;

As estações de tratamento de esgoto (ETE) são obras de engenharia destinadas ao tratamento de esgoto sanitário. A NBR 12.209/1989 estabelece as condições necessárias para a elaboração de projetos hidráulicos-sanitários de ETEs, estas são definidas pela norma como conjuntos de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cujo propósito é reduzir as cargas poluidoras do esgoto sanitário e tratar adequadamente a matéria residual resultante desse processo (ABNT, 1989).

Quanto à matéria residual, a norma NBR 12.209/1989 descreve o lodo como o material em suspensão aquosa composto por substâncias minerais e orgânicas que são separadas durante o tratamento (ABNT, 1989). Souza (2022) apresenta que a tipologia do lodo de esgoto é definida a partir do tratamento empregado e de sua origem, em sua composição a parcela orgânica e os nutrientes encontrados, como nitrogênio, carbono orgânico, fósforo e potássio, são originados dos excrementos humanos e resíduos alimentares presentes no esgoto doméstico.

O lodo pode ser classificado em diferentes tipos: primário, originado da remoção de sólidos em suspensão do esgoto afluente à ETE; biológico, proveniente de processos de tratamento biológico; misto, resultante da combinação de lodo primário e biológico; estabilizado, caracterizado pela ausência de putrefação; e seco, resultante de operação desidratação (ABNT, 1989). Segundo Metcalf e Eddy (2016), o lodo e os biossólidos podem se apresentar na forma líquida ou semissólida, sendo que os biossólidos devem atingir certos critérios benéficos para seu aproveitamento (como a aplicação na agricultura, por exemplo) para receber tal classificação. O termo lodo é aplicado quando relacionado ao processo em que foi criado, como o lodo primário.

Andreoli; Von Sperling e Fernandes (2001) apresentam o termo “lodo” enquanto subprodutos sólidos do tratamento de esgotos, e citam que os biossólidos representam o lodo gerado em processos biológicos de tratamento, também chamados de lodo biológico ou secundário. Os tipos de lodo podem também ser diferenciados como lodo aeróbio (não estabilizado), lodo aeróbio (estabilizado) e lodo anaeróbio (estabilizado). Segundo Dominguez (2014), o termo biossólido vem sendo consolidado diante da literatura internacional sobre o tema, remetendo aos sólidos que tenham passado por processos de estabilização e que tem seu uso permitido na agricultura, dessa forma, o termo não inclui os lodos de esgotos não estabilizados. Cita, ainda, que as legislações brasileiras em vigência, como a Resolução CONAMA nº 375/2006, trabalham com as denominações “lodo de esgoto” e “lodo estabilizado”, não fazendo referência ao novo termo. Dessa forma, em relação à aplicação do lodo na agricultura, os termos “lodo estabilizado” e “biossólidos” são considerados equivalentes.

O lodo primário normalmente é gerado nos decantadores primários, onde ocorre de 40 a 60% de remoção dos sólidos suspensos do efluente. Estes, isoladamente ou em flocos, sedimentam-se pelo peso, acumulando-se no fundo do equipamento, o teor de sólidos varia de 1 a 7%, apresentando grande porcentagem de matéria orgânica não estabilizada (RIGOLIN, 2022). Pode apresentar forte odor, especialmente com alto tempo de retenção em temperatura elevada (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Geralmente, apresenta cor

cinza e pode ser facilmente digerido. Para Metcalf e Eddy (2016), pode apresentar, enquanto composição química, de 1 a 6% de teor de sólidos secos, 60 a 85% de sólidos voláteis, pH na faixa de 5 a 9 e poder energético de 23.000 a 29.000 kJ/kgSSV.

O lodo secundário, oriundo de processo biológico, portanto também intitulado como lodo biológico ou lodo excedente, é composto majoritariamente por microrganismos e produtos extracelulares, ou seja, representa a própria biomassa que se desenvolveu a partir do alimento fornecido pelo esgoto afluente, além de remanescentes do tratamento primário. Em alguns casos, são mais estáveis e com menor umidade (RIGOLIN, 2022). O lodo biológico aeróbio estabilizado, gerado a partir de sistemas aeróbios, são compostos por microrganismos aeróbios que podem ficar mais tempo retidos no sistema dependendo da carga de matéria orgânica, apresentando condições de respiração endógena. O lodo biológico anaeróbio estabilizado pode ser originado em processos como as lagoas de estabilização e os reatores anaeróbios, em que a biomassa fica retida por longo tempo e ocorre digestão anaeróbio dela própria, fazendo com que este fique estabilizado e não dependa de etapa posterior de tratamento (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

O lodo digerido, lodo desidratado ou lodo seco é aquele que passou por processo de condicionamento, estabilização e desidratação, etapas classificadas como de tratamento do lodo, dessa forma ele encontra-se mais concentrado e inerte (RIGOLIN, 2022). Existem casos de sistemas combinados, onde o lodo primário pode passar por etapas de estabilização junto ao lodo biológico, nesses casos, o lodo retirado da mistura é chamado de lodo misto e, após as etapas de tratamento, é possível se obter um lodo seco composto inicialmente pelo lodo misto. Além disso, caso ocorra uma etapa físico-química no tratamento de esgoto, pode ser gerado o lodo químico (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei nº 12.305/2010, apresenta a seguinte definição para resíduos sólidos:

“resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;”

A Política distingui resíduos sólidos de rejeitos, apresentando rejeitos como:

“rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e

economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;”

A destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos, é postulado pela PNRS:

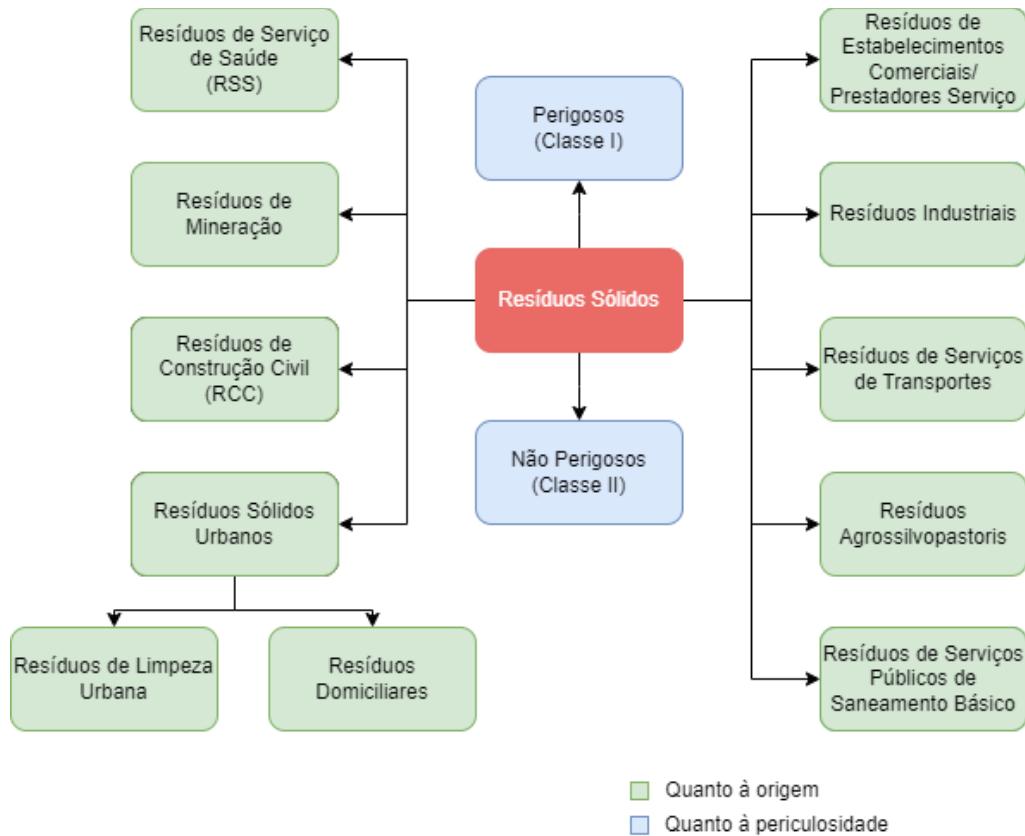
“destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;”

Restando aos rejeitos, a disposição final ambientalmente adequada, descrita nessa mesma legislação como:

”disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos; “

Neste contexto, a PNRS ressalta a importância de uma gestão eficiente e sustentável dos resíduos sólidos, visando à minimização dos impactos ambientais a partir de destinações finais que promovam o reaproveitamento, sendo apenas os rejeitos enviados à disposição final. A fim de fornecer diretrizes de gestão adequada, apresenta-se a divisão dos resíduos sólidos segundo sua origem e periculosidade, conforme apresentado na Figura 1. O lodo das ETEs, assim como os demais subprodutos sólidos gerados nesses sistemas, é classificado como resíduo dos serviços públicos de saneamento básico, a responsabilidade no seu gerenciamento é municipal, os resíduos sólidos das estações de tratamento de água e do manejo de águas pluviais também estão incluídos nessa classificação.

Figura 1 – Classificação de resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade.



Fonte: Adaptado da PNRS (BRASIL, 2010)

3.2. Justificativa para abordagem selecionada

No relatório intitulado *2022 Revision of World Population Prospects*, elaborado e publicado em 2022 pela Divisão de População do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais do Secretariado das Nações Unidas, foram divulgadas informações pertinentes às estimativas populacionais. De acordo com esse relatório, em 1950 a estimativa para o ano de 2022 foi de 2,5 bilhões de pessoas, porém o número projetou-se para 8 bilhões no ano em questão. Estima-se que até 2030 a população alcançará aproximadamente 8,5 bilhões, atingindo 9,7 bilhões em 2050 e 10,4 bilhões em 2100.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) é uma agência subordinada à Organização das Nações Unidas (ONU), que tem por objetivo promover o desenvolvimento da área da saúde em todo o mundo. Segundo a OMS, o saneamento básico está diretamente atrelado à saúde pública, tendo em vista o controle dos fatores ambientais que podem ser nocivos ao bem-estar físico, mental e social dos indivíduos (CABEDO JUNIOR *et al.*, 2018). Na agenda 2030 da ONU, são estabelecidos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estes são um apelo global

às ações que podem “acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade” (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2023).

É perceptível que há um desequilíbrio entre o saneamento básico ofertado e a demanda, especialmente considerando a expansão populacional nas zonas urbanas e nações subdesenvolvidas, essa deficiência interfere diretamente no desenvolvimento socioeconômico, saúde pública e no meio ambiente (CABEDO JUNIOR *et al.*, 2018). Esgotamento sanitário faz parte dos serviços de saneamento básico, como já definido, mas importante ressaltar que quando ocorre a coleta e o tratamento do esgoto, a quantidade de lodo gerado cresce proporcionalmente, sendo sua gestão complexa e onerosa, podendo assim comprometer as vantagens ambientais que estão sendo visadas no sistema (RIGOLIN, 2022).

O gerenciamento desse lodo enquadra-se em manejo de resíduos sólidos, que também é um serviço de saneamento básico, segundo PNRS são dadas diretrizes de priorização para: redução da geração, reaproveitamento e reciclagem e, por fim, disposição final ambientalmente adequada. A dificuldade do gerenciamento encontra-se nas grandes quantidades geradas e em suas diversas composições, sendo de importância a realização de análises para avaliação de possíveis destinações (RIGOLIN, 2022). A partir de dados dos últimos 5 anos (2016-2020) que foram divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), é possível notar a quantificação de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico apenas nos anos de 2019 e 2020.

No Brasil, o SINIR apresenta 113.953,81 toneladas de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico de ETEs gerados em 2020, uma grande redução se comparado a 2019, onde o número foi apontado em 1.536.084,71 toneladas. Parte destes tem a destinação final indicada na categoria “tratamento”, mas não há descrição do que foi efetuado, as demais destinações são “aterros sanitários” ou “lixões”/aterros controlados, tendo aumento significativo na disposição em “lixões”/aterros controlados em 2020 no país. Delimitando-se o estado de São Paulo, nesses 2 anos de divulgação, não é mencionada nenhuma destinação para “lixões”, todo resíduo foi destinado a aterros sanitários ou tratamento, sendo 100% para aterro sanitário em 2019. Os dados mencionados estão apresentados de forma visual e quantitativa na Tabela 1. A nível municipal, essas informações não estão disponíveis no SINIR.

Tabela 1 – Destinação de resíduos dos serviços públicos de saneamento básico gerados em ETEs 2019/2020

Abrangênci a	Ano	Destinação (tonelada)				Destinação (%)		
		Aterro Sanitário	Tratamento	Aterro Controlado/ "Lixão"	Total	Aterro Sanitário	Tratamento	Aterro Controlado/ "Lixão"
Nacional (Brasil)	2019	38.827,71	1.497.153,40	103,60	1.536.084,71	2,5	97,5	>1
	2020	72.724,44	27.360,52	13.868,85	113.953,81	64	24	12
Estadual (São Paulo)	2019	13.745,57	-	-	13.745,57	100	0	0
	2020	26.554,51	6.584,55	-	33.139,06	80,2	19,8	0

Fonte: Adaptado de SINIR (2023)

Ensaios de lixiviação e solubilização realizados por Rigolin (2022) com lodo residual biológico classificam o resíduo segundo NBR 10.004/2004, que norteia quanto aos riscos ao meio ambiente e saúde pública, estes foram definidos como Classe II A, não perigoso e não inerte, dessa forma, dispor em aterro sanitário não é inadequado e é uma alternativa ambientalmente mais favorável do que a disposição em aterros controlados e lixões. Porém, pensando-se que a disposição final é a indicação dada aos rejeitos, quando já não se há mais possibilidades de reaproveitamento, é possível pensar em alternativas de destinação final mais nobres para o lodo. No estado de São Paulo, apesar da redução em 20% do volume dos resíduos sólidos dos serviços públicos de saneamento básico gerados em ETEs destinado a aterro sanitário no comparativo entre 2019 e 2020 dos dados do SINIR, nota-se que em 2020 os 80% destinados ao aterro sanitário apresentaram quantidade maior que os 100% do ano anterior.

Tendo em vista a associação da tipologia de lodo ao processo de tratamento de esgoto no qual este foi gerado, tem-se que as características de composição do lodo são similares às do esgoto afluente. Com isso, existe a possibilidade de os componentes de esgoto conferirem características fertilizantes ao lodo, em casos de matéria orgânica rica em nutrientes, como também podem apresentar contaminantes tóxicos. A concentração de substâncias químicas no lodo define seu potencial de aplicação e necessidade de processos de tratamento a que deve ser submetido, sendo assim, o controle sistemático da composição do lodo se torna essencial (FERREIRA, 2021). Apresenta-se ainda que a presença de nitrogênio viabiliza a aplicação do lodo no solo considerando a agricultura, e também do fósforo, que é essencial para a produção agrícola (SOUZA, 2022).

O resíduo Classe II A, indica que as substâncias contaminantes cádmio, fenóis totais, ferro, manganês, nitrato e prata não ultrapassaram no extrato solubilizado os limites estabelecidos pela NBR 10.004/2004 (RIGOLIN, 2022), mas é relevante citar que diante de um ponto de vista biológico, a composição do lodo originado de esgotos sanitários apresenta as características do material fecal produzido pela população, desta forma, as características de saúde da população atendida definem a composição microbiológica do lodo. Com isso, dentre os microrganismos presentes, existem vírus, fungos, bactérias e parasitos (protozoários e helmintos), geralmente patogênicos. Dessa forma, quando considerada a aplicação do lodo na agricultura, uma etapa de desinfecção se faz necessária, visando eliminar os microrganismos patogênicos que resistem às etapas iniciais de tratamento do lodo (ANDREOLI *et al.*, 2001).

O objetivo da pesquisa de Rigolin (2022) foi avaliar a viabilidade técnica da incorporação do lodo de ETE em matriz cimentícia para a produção de peças de concreto para pavimentação, sendo assim uma alternativa de destinação final. Diversos estudos na área de materiais estão sendo realizados, como aplicação em argilas e cerâmicas, tendo em vista que as argilas permitem a presença de níveis de impurezas relativamente elevados e as cerâmicas são constituídas, em parte, pelas próprias argilas (AREIAS *et al.*, 2017), sendo necessário aprofundamento nas propriedades mecânicas *versus* porcentagem de incorporação. Também são realizadas aplicações em incineração, para aproveitamento do poder calorífico do resíduo, e outras medidas mais diversas como a controle de erosões e recuperação de áreas degradadas, matéria-prima para compostos orgânicos e aplicação em telhados verdes. Há potencial até na produção de biodiesel utilizando-se o lodo como matéria-prima (URBAN; ISAAC; MORITA, 2019).

Sendo assim, conclui-se que há uma alta gama de possibilidades para a destinação do lodo gerado em sistemas de tratamento de esgotos e, tendo em vista que a composição desse resíduo depende do próprio esgoto afluente e do tipo de tratamento adotado, pensa-se que o estudo dos volumes gerados segundo os sistemas das ETEs e os impactos das alternativas de destinação sejam de contribuição para a continuidade do tema, assim como a replicabilidade para outros estudos de casos e os potenciais de reaproveitamento, em especial visando o balanço energético, são sugeridos como aprofundamento para trabalhos futuros.

3.3. Processos de tratamento de esgoto e resíduos gerados

Para caracterizar-se os principais componentes dos esgotos domésticos, do ponto de vista químico, importante levantar-se os parâmetros: sólidos totais em suspensão (fixos e voláteis), sólidos totais dissolvidos (fixos e voláteis), sólidos sedimentáveis, matéria orgânica,

nitrogênio total (orgânico, amônia, nitrito e nitrato), fósforo (orgânico e inorgânico), pH, alcalinidade e cloreto. Do ponto de vista biológico, estão presentes microrganismos, como bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos. As características físicas primordiais incluem temperatura, cor, odor e turbidez (JORDÃO e PESSOA, 2011).

As ETEs são estratégias de controle de poluição dos cursos d'água. A seleção do nível e tipo de tratamento é baseada nas características do esgoto e nos padrões de lançamento no corpo receptor, buscando uma solução eficaz e de menor custo, ou seja, avaliando-se fatores ambientais, sociais, técnicos e econômicos (GARRIDO-BASERBA *et al.*, 2012). Silva *et al.* (2020) afirma que para a condução de soluções mais sustentáveis nas tomadas de decisões relativas ao tratamento de esgoto é imprescindível a avaliação integrada e espacial. Adotar uma abordagem holística, considerando a bacia hidrográfica como um todo, ao invés de tratar problemas isolados, pois isso possibilita uma variedade maior de alternativas que sejam estrategicamente mais favoráveis para alcançar os objetivos de qualidade da água na região.

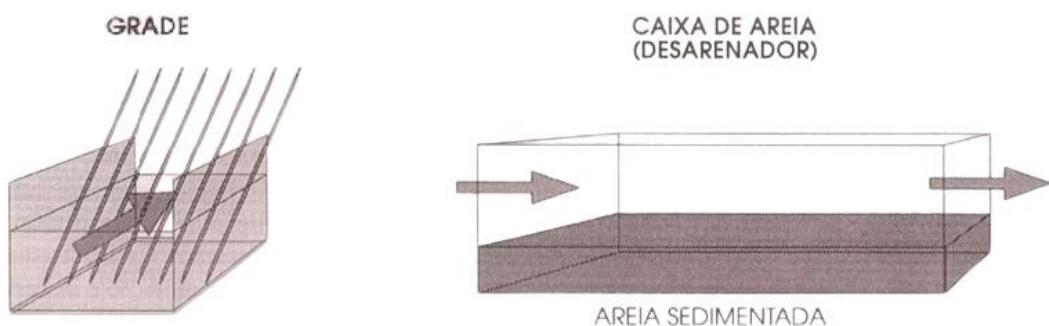
Os níveis de tratamento em uma ETE podem ser classificados da seguinte forma: tratamento preliminar, que visa à remoção de sólidos grosseiros; tratamento primário, que remove sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica; tratamento secundário, cujo objetivo principal é a remoção da matéria orgânica; e tratamento terciário, que complementa o tratamento secundário e visa à remoção de poluentes específicos, geralmente tóxicos e não biodegradáveis (VON SPERLING, 1996). É possível classificar as operações unitárias e processos dos sistemas de tratamento em físicos, químicos e biológicos, a depender do método empregado, os tratamentos preliminar e primário são predominantemente compostos por processos de remoção física, enquanto o tratamento secundário é baseado em processos biológicos e o terciário por processos biológicos e químicos, todavia este último é pouco aplicado no Brasil (METCALF e EDDY, 2016).

3.3.1. Tratamento preliminar

O tratamento preliminar é a primeira etapa que o esgoto encontra na estação de tratamento, desempenhando um papel essencial para o bom funcionamento das etapas subsequentes. Além de retirar parcialmente a carga poluidora, essa etapa também protege a infraestrutura, como tubulações e bombas, evitando o acúmulo de gorduras e resíduos que podem causar incrustações e corrosão. Seu principal objetivo é a remoção de sólidos grosseiros, areia e gorduras, realizada majoritariamente mediante operações físicas, como gradeamento e desarenador (PEDROZA *et al.*, 2010).

O gradeamento consiste em barras espaçadas em intervalos específicos. Segundo Jordão e Pessoa (2011), é possível classificar os tipos de grades de acordo com o tamanho desses espaçamentos, sendo: grossa (100 a 40 mm), média (40 a 20 mm), fina (20 a 10 mm) e ultrafina (10 a 3 mm). Borges (2014) aponta que a principal finalidade do gradeamento é retirar os resíduos sólidos lançados indevidamente nas redes de esgoto, enquanto o desarenador tem por objetivo retirar sólidos com características de sedimentação semelhantes à areia. A Figura 2 ilustra os tratamentos mencionados.

Figura 2 – Esquema de Grade e Desarenador



Fonte: Von Sperling (1996)

A Water Environment Federation (1998) sugere três requisitos básicos para tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros, proteção de equipamentos e tubulações, e melhoria do desempenho do tratamento subsequente por meio do controle de picos de vazão e carga orgânica (PRADO, 2006). Considerando a composição química dos poluentes do esgoto sanitário, Von Sperling (1996) afirma que as operações, como gradeamento e desarenador, visam à remoção de sólidos suspensos grosseiros. Conclui-se que os subprodutos sólidos resultantes desses processos são sólidos grosseiros, areia e escumas (materiais flutuantes) (PEDROZA *et al.*, 2010).

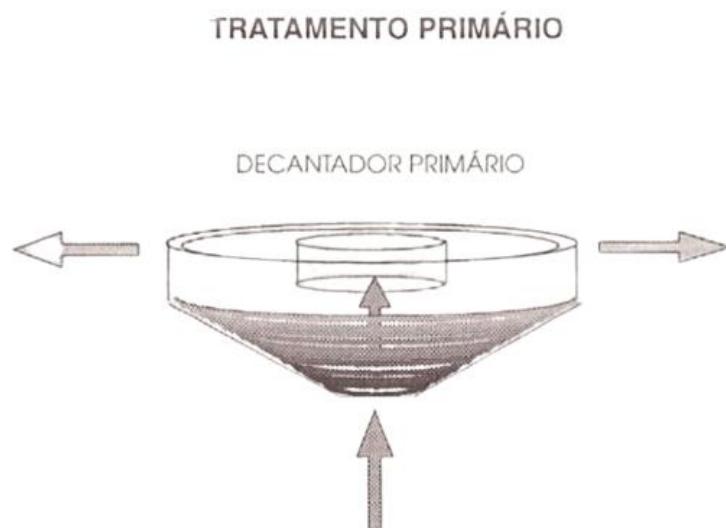
3.3.2. Tratamento primário

O tratamento primário promove a remoção dos sólidos em suspensão não grosseiros por meio do processo físico de sedimentação. Um dos principais desafios da poluição da água é a presença de matéria orgânica no esgoto. Em geral, métodos indiretos são utilizados para quantificar a matéria orgânica ou seu potencial poluidor, sendo a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) o parâmetro tradicionalmente utilizado. O tratamento primário constitui uma

etapa intermediária nos sistemas de tratamento, na qual são removidos os sólidos sedimentáveis em suspensão e, consequentemente, a DBO suspensa ou particulada (matéria orgânica presente nos sólidos em suspensão) (FREITAS, 2020).

Conforme ilustrado na Figura 3, os decantadores ou tanques de decantação, são estruturas por onde o esgoto flui lentamente, permitindo a sedimentação de partículas com densidade maior que a fase líquida, bem como de materiais flutuantes, com densidade menor. Quanto aos subprodutos sólidos, tem-se formação de escuma devida a materiais flutuantes, e o lodo, que é composto pela massa sólida dos materiais sedimentados (PEDROZA *et al.*, 2010).

Figura 3 – Decantador Tratamento Primário



Fonte: Von Sperling (1996)

3.3.3. Tratamento secundário

No tratamento secundário, os processos biológicos têm sido amplamente reconhecidos como eficazes na remoção de matéria orgânica em grande escala. Esses processos podem ocorrer por meio de microrganismos aeróbios e anaeróbios, gerando como subprodutos principais água, dióxido de carbono e lodo residual, com a adição de geração de gás metano em sistemas anaeróbios (OLIVEIRA, 2004). A quantidade de lodo produzida nos sistemas de tratamento de esgoto varia de acordo com a alternativa empregada, sendo observada uma maior produção nos processos aeróbios em comparação aos processos sem a presença de oxigênio (METCALF e EDDY, 2016).

Além da DBO suspensa, já mencionada, que pode ser removida por processos físicos, como a própria sedimentação do tratamento primário, a matéria orgânica também é formada

pela DBO solúvel, que compreende a fase necessariamente removida por processos biológicos. Esses processos biológicos têm como princípio a aceleração dos mecanismos naturais de degradação, ou seja, a matéria orgânica biodegradável é removida por meio de reações bioquímicas realizadas por microrganismos que a convertem em gás carbônico, água e material celular e, em processos anaeróbios, também ocorre a formação de metano (VON SPERLING, 1996). Normalmente as bactérias estão presentes em grandes quantidades, mas também há outros microrganismos, como vírus e protozoários (PEDROZA *et al.*, 2010).

Existem diversos mecanismos empregados para o tratamento secundário, tanto isoladamente, quanto em sistemas combinados. As estações geralmente dispõem de tratamento preliminar, mas a depender do secundário empregado, pode não dispor de tratamento primário. Processos biológicos aeróbios podem ser realizados por lodos ativados e filtros biológicos, porém este segundo também pode ser utilizado de forma anaeróbia, e outros mecanismos anaeróbios são as lagoas e reator UASB, sendo que as lagoas também podem operar de forma facultativa, ou seja, com a presença de microrganismos aeróbios e anaeróbios (VON SPERLING, 1996).

A presença ou ausência de oxigênio na operação influí diretamente na geração de subprodutos sólidos, além disso o tipo de processo determina o nível de digestão da matéria celular, indicando o grau de estabilização do lodo (PEDROZA *et al.*, 2010). O item 2.2 e 2.3 apresentam com maiores detalhes a formação de lodo a partir dos processos biológicos e os possíveis tipos de lodo gerados, incluindo inclusive o lodo do processo primário resultante da remoção física de sólidos suspensos (DBO suspensa).

3.3.4. Tratamento terciário

O tratamento terciário é capaz de remover poluentes específicos, como nutrientes, patogênicos, não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes. Empregado para a remoção de tóxicos ou remoção complementar de compostos não suficientemente removidos no tratamento secundário, porém é raramente empregado nos sistemas de tratamento de esgoto sanitário no Brasil (METCALF e EDDY, 2016).

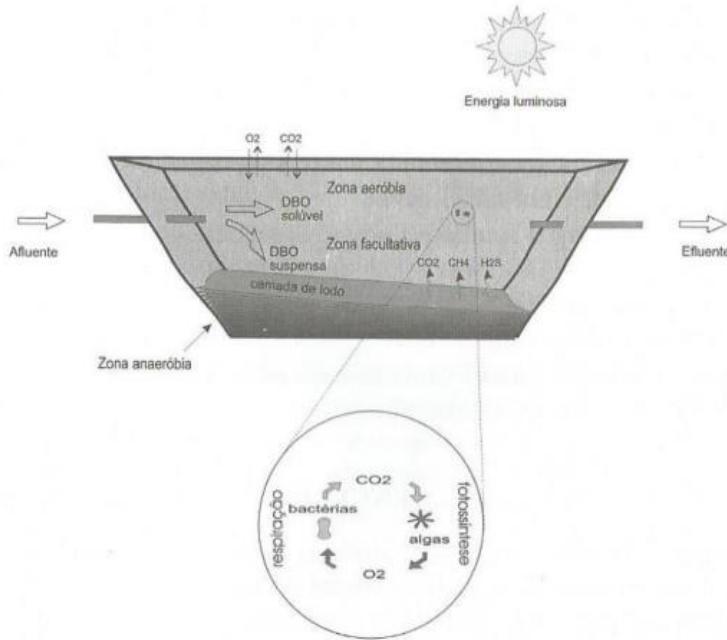
3.4. Formação de lodo por tipos de tratamento biológico

3.4.1. Lagoas de estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas que podem apresentar diversas combinações. A versão mais simples é representada pela lagoa facultativa, também chamada de facultativa primária, cujo processo consiste na retenção do esgoto por tempo suficiente para que os processos naturais de estabilização aconteçam. Já nas lagoas anaeróbias, há uma alta carga de DBO com alto consumo de oxigênio apresentando condições de tratamento estritamente anaeróbias. São mais profundas em relação às facultativas, na faixa de 3 a 5 metros, a fim de diminuir a entrada de oxigênio da camada mais superficial para as camadas mais profundas. A ordem de eficiência das lagoas anaeróbias é de 50 a 70%, necessitando tratamento secundário tendo em vista a elevada DBO efluente. Com isso, os sistemas australianos são usualmente utilizados, compostos de lagoas anaeróbias seguidas de lagoas facultativas (VON SPERLING, 2002).

As lagoas facultativas apresentam três zonas: zona aeróbia, zona anaeróbia e zona facultativa, como o esquema apresentado na Figura 4. A zona aeróbia é formada pela matéria orgânica dissolvida, ou DBO solúvel, que permanece na camada superficial da lagoa. A zona facultativa é intermediária, sendo a área em que ocorre degradação tanto na presença, quanto na ausência de oxigênio. A zona anaeróbia é representada por uma camada de lodo formada a partir da sedimentação da matéria orgânica em suspensão, ou dos subprodutos gerados nas camadas superiores, que sofre decomposição pelos microrganismos anaeróbios e é convertida a água, gás carbônico, metano e outros. Já nas lagoas anaeróbias, existem apenas as zonas facultativa e anaeróbia, evidenciando a degradação de matéria orgânica por via anaeróbia (GONÇALVES *et al.*, 1999).

Figura 4 – Compartimentos da lagoa facultativa



Fonte: Von Sperling (2002)

Segundo Gonçalves *et al.* (1999), enquanto a fração orgânica do lodo é composta por matéria orgânica em decomposição e microrganismos, a fração inorgânica é representada pelo material inerte, como partículas sólidas não biodegradáveis presentes no esgoto. É relevante ressaltar também que, os produtos solúveis intermediários da fração orgânica são reintroduzidos na massa líquida, que são responsáveis por nova carga de DBO na lagoa. Dessa forma, o acúmulo do lodo irá depender das características do esgoto e do funcionamento efetivo do tratamento preliminar. Além disso, as lagoas que atuam de forma primária dentro do tratamento biológico retêm um alto percentual dos sólidos sedimentáveis, fazendo com que a produção de lodo nestas lagoas receba mais enfoque em comparação com as lagoas secundárias, que apresentam uma retenção de sólidos pouco significativa.

Von Sperling (2002) apresenta que a taxa de acúmulo média de lodo em lagoas facultativas é da ordem de 0,03 a 0,08 m³/hab.ano, sendo uma baixa taxa que resulta em baixo volume de lodo na lagoa. Para as lagoas anaeróbias, cita-se que a taxa de acúmulo de lodo é da ordem de 0,03 a 0,10 m³/hab.ano. Neste caso, pelas características dimensionais das lagoas anaeróbias, que são menores em volume e mais profundas que as facultativas, nota-se o acúmulo de lodo em menor tempo, e tem por consequência a necessidade de gerenciamento adequado de remoção. Indica-se, ainda, a remoção do lodo quando a camada atingir cerca de $\frac{1}{3}$ da sua altura útil, ou uma remoção com periodicidade anual por meio de uma limpeza

sistemática na lagoa. A Tabela 2 apresenta as quantidades de lodo comumente produzidas em lagoas de estabilização.

Tabela 2 – Características e quantidade de lodo produzido em lagoas de estabilização

Sistema	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Lagoa facultativa	0,12 - 0,32	5 - 15	12 - 32	0,1 - 0,25
Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa				
Lagoa anaeróbia	0,20 - 0,45	15 - 20	20 - 45	0,1 - 0,3
Lagoa facultativa	0,06 - 0,10	7 - 12	6 - 10	0,05 - 0,15
Total	0,26 - 0,55	-	26 - 55	0,15 - 0,55

Fonte: Adaptado de Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001)

3.4.2. Lodos ativados

Metcalf e Eddy (2016) citam que o funcionamento dos sistemas aeróbios depende da disponibilidade de oxigênio, que pode não ser suficiente pelo contato entre ar e água. Dessa forma, para atingir as quantidades de oxigênio necessárias, são inseridas interfaces adicionais, sendo possível tanto a introdução de oxigênio no líquido, quanto a exposição deste líquido à atmosfera.

Oliveira *et al.* (2013) apresenta o funcionamento dos lodos ativados como um processo baseado no cultivo de biomassa em suspensão em tanque de aeração, sendo os microrganismos responsáveis pela floculação e decomposição biológica de coloides no esgoto. Com a etapa de decantação após o tanque de aeração, a biomassa retorna para o processo, enquanto o lodo excedente é enviado para tratamento. É citado por Von Sperling (1997) que esse sistema possui maior índice de mecanização em comparação com outros sistemas de tratamento, resultando em um consumo mais elevado de energia e maiores custos de operação.

O tempo de retenção dos sólidos (TRS), ou idade do lodo, indica o tempo médio em que o lodo é retido no sistema. Para o processo de lodos ativados, é o parâmetro mais importante, tendo em vista que afeta diversas variáveis, entre elas, a produção de lodo. Metcalf e Eddy (2016) citam que a produção de lodo diminui conforme o aumento do TRS e da temperatura, considerando uma maior taxa de respiração endógena criada. É citado também que a produção de lodo é maior sem a utilização de um tratamento primário, tendo em vista que a quantidade

de sólidos suspensos voláteis permanece no afluente ao reator. A Tabela 3 apresenta a quantidade de lodo produzido em sistemas de lodos ativados.

Os sólidos sedimentados no decantador secundário são levados para a etapa de recirculação para o reator com o objetivo de aumentar a concentração de biomassa, resultando em maior eficiência do sistema de tratamento. Dito isso, a reprodução dos microrganismos é contínua, e visando o equilíbrio do sistema, prevê-se a retirada de, aproximadamente, a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução, que se resume ao lodo biológico excedente, que deve passar por processo de tratamento (VON SPERLING, 1997).

O sistema de lodos ativados convencional apresenta um decantador primário, com o objetivo de reduzir o consumo de energia para o processo de aeração e, também, do volume do reator biológico. Assim, tem-se a retirada de parte dos sólidos em suspensão antes do tanque de aeração. O sistema apresenta idade do lodo usual de 4 a 10 dias, que leva a necessidade de uma etapa de estabilização para o lodo excedente retirado, devido ao teor de matéria orgânica (VON SPERLING, 1997).

O sistema de lodos ativados com aeração prolongada mantém a biomassa retida em um período de 17 a 30 dias, por consequência, tem maior quantidade de microrganismos em relação ao sistema convencional. Além disso, o volume do reator neste modelo também é maior, com isso, a relação entre a matéria orgânica aplicada e o volume do reator é menor, assim como a relação alimento e microrganismo. Devido a isso, as bactérias utilizam a matéria orgânica de suas células nos processos metabólicos, correspondendo a estabilização da biomassa. Procura-se evitar outra forma de geração de lodo que possa necessitar estabilização posteriormente, como o decantador primário, uma vez que não há necessidade de estabilização do lodo excedente do sistema de aeração prolongada (SUNDEFELD JUNIOR, 2007). Além disso, considerando a aplicação de sistemas de lodos ativados como pós tratamento para efluentes anaeróbios, cita-se a possibilidade de retorno do lodo ao reator anaeróbio para adensamento e digestão juntamente ao lodo anaeróbio (VON SPERLING, 1997).

Tabela 3 – Características e quantidade de lodo produzido em sistemas de lodos ativados

Sistema	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Lodos ativados convencional				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 22
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados com aeração prolongada	0,50 - 0,55	0,8 - 12	40 - 45	3,3 - 5,6

Fonte: Adaptado de Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001)

3.4.3. Filtros

Metcalf e Eddy (2016) citam o filtro biológico como o processo de crescimento aeróbio aderido mais comum, em que o esgoto é distribuído pela área superficial de um tanque, com um material de enchimento não submerso. Podem ter altura variável de 5 a 10 m e são preenchidos com material plástico com foco na aderência do biofilme, que deve preencher de 5 a 10% do volume do tanque. Além disso, a circulação de ar pode ser propagada por sopradores ou naturalmente, para que os microrganismos cresçam como um filme aderido. Apresenta-se a necessidade de uma etapa de separação líquido-sólido para a produção do efluente com uma concentração de sólidos aceitável, e os sólidos são coletados no fundo do decantador para o processamento do lodo.

Em sistemas aeróbios, a degradação biológica com conversão em CO₂ ocorre em uma faixa de 40 a 50%, enquanto a incorporação de matéria orgânica como biomassa ocorre em uma faixa de 50 a 60%, fazendo com que a geração de lodo excedente seja maior em relação a sistemas anaeróbios (CHERNICHARO, 1997).

Segundo Nascimento (2001), os filtros biológicos percoladores são sistemas aeróbios, enchidos por um meio suporte, em que o esgoto é aplicado de maneira contínua por distribuidores, que podem ser rotativos, movidos por carga hidráulica ou energia elétrica, ou estacionários. A partir da taxa hidráulica aplicada à superfície da carga orgânica aplicada ao volume de leito percolador, são apresentadas cinco classificações dos filtros biológicos

percoladores, em uma escala crescente: baixa taxa, taxa intermediária, alta taxa, taxa super alta e grossoiro. A Tabela 4 apresenta as principais diferenças entre as 5 classificações.

Tabela 4 – Principais características dos filtros biológicos percoladores

Condições operacionais	Taxas operacionais				
	baixa	intermediária	alta	super alta	grosseiro
Meio suporte	Pedra, Escória	Pedra, Escória	Pedra, Escória	Plástico	Plástico
Taxa de aplicação superficial (m ³ /m ² .d)	1 a 4	4 a 10	10 a 40	12 a 70	45 a 185
Carga orgânica volumétrica (kgDBO/m ³ .d)	0,08 a 0,40	0,24 a 0,48	0,48 a 1,00	0,48 a 1,60	1,60 a 5,00
Altura da camada suporte (m)	1,5 a 2,4	1,8 a 2,4	0,9 a 1,8	3,0 a 12,0	4,6 a 12
Eficiência de remoção de DBO (%)	80 a 90	50 a 70	65 a 85	65 a 80	40 a 65

Fonte: Adaptado de Nascimento (2001)

É citado também que com a menor carga de DBO aplicada nos filtros de baixa taxa, tem-se menor disponibilidade de matéria orgânica para consumo, resultando em estabilização parcial do lodo por autoconsumo de biomassa. Os filtros biológicos de alta taxa têm seu funcionamento similar aos de baixa taxa, em que também ocorre uma estabilização parcial do lodo, diferenciando-se por receber maior carga de DBO e apresentar recirculação do efluente (NASCIMENTO, 2001).

Os filtros aerados submersos, um dos modelos de filtros biológicos, têm os microrganismos crescendo no meio suporte e podem eliminar a necessidade de recirculação de lodo. Castagnato (2006) apresenta que os filtros podem ter fluxo ascendente ou descendente para promoção da remoção de matéria orgânica, mas que a depender do tipo de material suporte, pode ser necessária uma unidade de decantação para a retenção da biomassa em suspensão. Além disso, o lodo gerado não apresenta problemas de sedimentação por bactérias filamentosas e não necessitam de etapa de clarificação posterior. Os filtros aerados submersos quando combinados à uma etapa de tratamento anterior, como um processo anaeróbio, podem ter a produção de lodo reduzida.

Os filtros anaeróbios são tanques em que o material de enchimento forma um leito fixo, sendo a superfície deste material o local onde ocorre o desenvolvimento dos microrganismos, que são aderidos na forma de grânulos ou flocos. Sendo assim, é um sistema em que o fluxo acontece por meio do lodo ativo e da biomassa aderida (ANDRADE NETO, 2004). Tem-se como principal objetivo aumentar o tempo de retenção celular, visando maior contato entre a biomassa e o efluente. A depender do modelo de distribuição de esgoto dentro do filtro, um crescimento excessivo de microrganismos pode ocorrer, dessa forma, são indicados para o tratamento de efluentes de sólidos em suspensão de pequena dimensão. Ademais, o filtro anaeróbio não apresenta necessidade de recirculação dos sólidos e tem baixa geração de lodo (CASTAGNATO, 2006). A Tabela 5 indica a quantidade de lodo produzida em filtros biológicos.

Tabela 5 – Características e quantidade de lodo produzido em filtros biológicos

Sistema	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Filtros biológicos de alta carga				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,20 - 0,30	1 - 25	20 - 30	0,8 - 3,0
Total	0,55 - 0,75	1,5 - 4,0	55 - 75	1,4 - 5,2
Filtro aerado submerso				
Lodo primário	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Lodo secundário	0,25 - 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 - 6,0
Total	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2

Fonte: Adaptado de Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001)

3.4.4. Reator UASB

CHERNICHARO (1997) apresenta enquanto características favoráveis dos sistemas anaeróbios o fato de serem tecnologias simples e de baixo custo, a possibilidade de preservação da biomassa, capacidade de aplicação em pequena e grande escala, a produção de metano e baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes menor à produção de processos aeróbios. Enquanto desvantagens, tem-se que as bactérias anaeróbias podem ser inibidas por uma série

de compostos, geralmente existe a necessidade de pós-tratamento e que o início do processo pode ser lento na ausência de lodo de semeadura. Em sistemas anaeróbios, cerca de 70 a 90% do material orgânico é convertido em biogás, enquanto apenas 5 a 15% deste é convertido em biomassa e posteriormente, em lodo excedente do sistema, que se apresenta com boas características de desidratação.

O processo de tratamento nos reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) consiste na entrada da água resíduária pela base do reator, que por meio do fluxo ascendente passa pelo leito de lodo, passa pelo separador trifásico e é retirado na parte superior, por meio de um decantador. Os flocos de lodo carregados pelas bolhas de gás se desprendem e retornam ao manto de lodo, assim como as partículas sólidas presentes na parte líquida, que são decantadas e retornam ao manto de lodo (LOPES, 2015). A Tabela 6 mostra a quantidade de lodo produzido em reatores UASB.

A principal diferença do reator UASB para outros tipos de sistemas anaeróbios se dá pela auto adesão dos microrganismos, não sendo necessária a existência de um meio suporte para a biomassa. Além disso, tem capacidade de desenvolvimento de alta quantidade de biomassa ativa, resultando em alto tempo de retenção celular. Com isso, pela digestão dos sólidos pela própria biomassa, gera lodo excedente bem estabilizado, necessitando apenas de secagem posteriormente (CAMPOS *et al.*, 1999). Destaca-se também a possibilidade de geração e coleta de biogás, considerando o aproveitamento energético a partir do metano gerado (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Dada a recorrente necessidade de pós tratamento para efluentes de reatores anaeróbios para o atendimento dos padrões de qualidade, existem diversas configurações de sistemas combinados que visam atingir a eficiência máxima de tratamento. Um sistema combinado de reator anaeróbio seguido de reator anaeróbio, por exemplo, é o reator UASB seguido de filtro anaeróbio, para o pós tratamento da DBO remanescente do efluente primário. Já na combinação sistema anaeróbio seguido de sistema aeróbio, pode-se pensar não só em tratamento da matéria orgânica, mas também na remoção de outros poluentes; um exemplo é reator UASB seguido de filtro aerado submerso, em que o UASB pode funcionar como adensador e digestor do lodo excedente do filtro, diminuindo a necessidade de tratamento do lodo (CHERNICHARO *et al.*, 2018).

Tabela 6 – Características e quantidade de lodo produzido em reator UASB

Sistema	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.dia)	Volume de lodo (L/hab.dia)
Reator UASB	0,12 - 0,18	3 - 6	12 - 18	0,6 - 2,2
UASB + pós tratamento aeróbio				
Lodo anaeróbio	0,12 - 0,18	3 - 4	12 - 18	0,3 - 0,6
Lodo aeróbio	0,08 - 0,14	3 - 4	8 - 14	0,2 - 0,5
Total	0,20 - 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 - 1,1

Fonte: Adaptado de Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2001)

3.5. Processos de tratamento de lodo

De acordo com Andreoli; Von Sperling e Fernandes (2001), tem-se que o gerenciamento do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto é de alta complexidade, sendo considerado inclusive pela Agenda 21, no tópico de “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”. São definidas, enquanto orientações para uma gestão adequada, a redução da produção, o aumento da reutilização e reciclagem e, também, a produção de tratamentos ambientalmente adequados.

A gestão do lodo de esgoto se mostra essencial para estabelecer uma destinação final ambientalmente adequada para esse tipo de resíduo. As necessidades apresentadas para a gestão se diferenciam considerando os contextos sociais, econômicos, técnicos e legais aos quais sua geração está inserida. Para a definição das melhores estratégias de manejo, considera-se as características do lodo, nível de urbanização e área disponível, enquanto para a definição de tecnologias de tratamento, considera-se os limites sanitários adotados no país e foca-se na redução do volume que será transportado para a destinação final (SOUZA, 2022).

Souza (2022) considera como principais etapas de tratamento de lodo a seguinte sequência: adensamento, estabilização, desaguamento e higienização. Leite (2015), por outro lado, considera adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento e higienização. Andreoli *et al.* (2001) considera como parte do processamento do lodo as etapas de estabilização, desaguamento e estabilização. Dessa forma, tem-se que a sequência dos processos pode ser alterada, a depender das características e necessidades, e que alguns

processos podem se sobrepor aos outros, mas apresentam os mesmos objetivos principais: a redução da umidade e eliminação dos patógenos presentes no lodo.

Reis (2017) adiciona que, em relação às etapas necessários no processo de tratamento de lodo, pode ser necessária uma etapa posterior ao desaguamento do lodo para remoção efetiva da parcela de água presente, tendo em vista que as etapas de desaguamento existentes, sendo naturais ou mecânicas, atingem teor de sólidos final de cerca de 25%. Com isso, para remoção da parcela de umidade remanescente, podem ser aplicados métodos de secagem como etapa final do tratamento de lodo de esgotos.

A etapa de adensamento do lodo é representada pela concentração dos sólidos, por meio de processos físicos, visando a redução da umidade presente e, consequentemente, do volume final. Tem-se como alternativa o adensamento por gravidade, funcionando como um decantador primário, em que o lodo sedimentado é removido e enviado para a próxima etapa de tratamento, e o efluente líquido retorna ao início do tratamento primário. Além disso, pode ser realizado o adensamento por flotação, que realizada a separação da parcela sólida por meio da introdução de bolhas de ar, que se aderem às partículas sólidas e se acumulam na superfície para serem removidas (LEITE, 2015). O adensamento do lodo pode ser realizado mecanicamente, porém apresenta-se que, usualmente, o lodo primário é adensado por gravidade, e o lodo secundário é adensado por flotação, embora também possa ter adensamento por gravidade (REIS, 2017).

Ferreira (2021) apresenta enquanto objetivos da estabilização da parcela biodegradável da matéria orgânica a diminuição da putrefação e a eliminação de odores e concentração de patogênicos. A estabilização biológica inclui a digestão aeróbica, que ocorre na presença de oxigênio e tem alto consumo de energia no processo de mistura e aeração, e digestão anaeróbica, que acontece na ausência de oxigênio e gera metano durante o processo de fermentação. A estabilização química é realizada por meio da adição de produtos químicos alcalinos, visando o controle de pH e promovendo uma redução significativa de patogênicos, no entanto, pode ocasionar aumento da massa de lodo. Ademais, a estabilização térmica por meio de um processo de adição de calor, com processo similar ao de digestão aeróbica, e produz lodo estabilizado com alto teor de sólidos, alta concentração de nitrogênio e ausência de patogênicos. Além disso, embora os processos apresentem a diminuição dos patogênicos, existe a necessidade de pós-tratamento para higienização, focando em atender exigências de disposição final.

A etapa de condicionamento do lodo é representada por um processo de coagulação, que visa desestabilizar as partículas, seguido de floculação, com o objetivo de aglomerar as partículas coloidais e sólidos finos por meio de baixos níveis de agitação. Esse processo gera o aumento das partículas do lodo por meio da agregação de partículas pequenas e grandes, que

influencia diretamente a etapa de desaguamento, uma vez que a eficiência dos processos mecanizados de desaguamento depende do grau de umidade lodo advindo do condicionamento. Cita-se, como principais objetivos dessa etapa, a redução do potencial patogênico e aumento do grau de estabilização, e é apresentado que o condicionamento químico seguido de desaguamento pode reduzir a umidade do lodo de uma faixa de 90 a 99% para 65 a 80% (VANZETTO, 2012).

A etapa de desaguamento visa o aumento da concentração de sólidos no lodo, a partir da remoção da parcela líquida deste; apresenta-se que o lodo desaguado contém de 13 a 40% de matéria seca. Enquanto objetivos dessa etapa, tem-se a redução de custos com transporte, facilitar o manejo e aumentar o poder calorífico do lodo, visando o aumento da possibilidade de incineração, diminuição do volume disposto em aterros sanitários e a possibilidade de aplicação na agricultura (SOUZA, 2022). Os métodos de desaguamento podem ser mecanizados ou naturais, e a eficiência destes depende de qual método é aplicado e quais são as características específicas do lodo. Os métodos de desaguamento mecanizados podem ser impactados pelas características dos equipamentos e condições de operação, enquanto os métodos naturais, além da estrutura física do método, dependem de condições climáticas (REIS, 2017). Cita-se, enquanto principais métodos mecânicos, as centrífugas, filtros prensa de esteira e de placas e os filtros a vácuo, e comumente enquanto processos naturais, os leitos de secagem e lagoas de lodo (LEITE, 2015).

O sistema de higienização do lodo, que visa a remoção dos microrganismos patogênicos ali presentes, apresenta algumas alternativas de baixo custo, como a caleação, a compostagem e o tratamento térmico. A caleação acontece a partir da elevação do pH para valores iguais ou maiores que 12, causando a inativação dos patógenos por meio do calor gerado pelas reações químicas de hidratação de cal. A compostagem realiza a higienização dos patógenos a partir do aumento da temperatura gerado pela biodegradação da matéria orgânica. Ademais, o tratamento térmico utiliza fontes de calor como a energia solar e o biogás para atingir a desinfecção (ANDREOLI *et al.*, 2001).

3.6. Destinação final de lodo

Conforme apresentado na Tabela 1, o aterro sanitário é a destinação final para os resíduos de serviços públicos de saneamento básico mais utilizada no estado de São Paulo e a segunda mais utilizada no Brasil, segundo dados dos últimos dois anos em que ocorreu a divulgação pelo SINIR (2019-2020). Importante ressaltar que a PNRS estabelece a organização e manutenção do SINIR, articulado aos demais sistemas de informação nacional, de forma

conjunta entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios, cabendo aos três últimos o fornecimento das informações sobre os resíduos sólidos de sua área de competência ao órgão federal responsável pela coordenação do SINIR.

Os aterros sanitários são locais de disposição final, suas obras de engenharia são norteadas pela NBR 13.896/1997, que estabelece as condições mínimas para o projeto, visando a proteção adequada dos recursos naturais e populações vizinhas, como por exemplo a coleta de gases, uso de drenos de percolados e de água pluviais, trazendo inclusive diretrizes para o processo de desativação, ao final de sua vida útil, que deve ser de no mínimo de 10 anos. Diversos outros critérios devem ser levados em consideração para que se tenha um local adequado para o projeto, como aspectos geológicos e topográficos, distância mínima de 200 m de recursos hídricos e de 500 m de núcleos populacionais, facilidade no acesso, características climáticas, estimativas populacionais, informações sobre os resíduos gerados, entre outros. (ABNT, 1997).

O lodo, quando disposto em aterros sanitários, decompõe-se por meio de processos anaeróbio, dessa forma, não ocorre aproveitamento de seus nutrientes, refletindo em uma degradação mais lenta da matéria orgânica e na produção de subprodutos gasosos, como o metano; líquidos, como o chorume. Se misturado com outros resíduos sólidos urbanos a biodegradação ocorre de maneira mais acelerada. A quantidade de lodo a ser disposta infere diretamente na vida útil do aterro (GEWEHR, 2009). Schalch, Castro e Córdoba (2015) mencionam a classificação de aterros sanitários de pequeno porte, para quando há recebimento de no máximo 20 toneladas por dia, nestes casos tem-se a NBR 15.849/2010 que seguem a mesma linha de critérios para os aterros sanitários de maior porte, porém de forma simplificada.

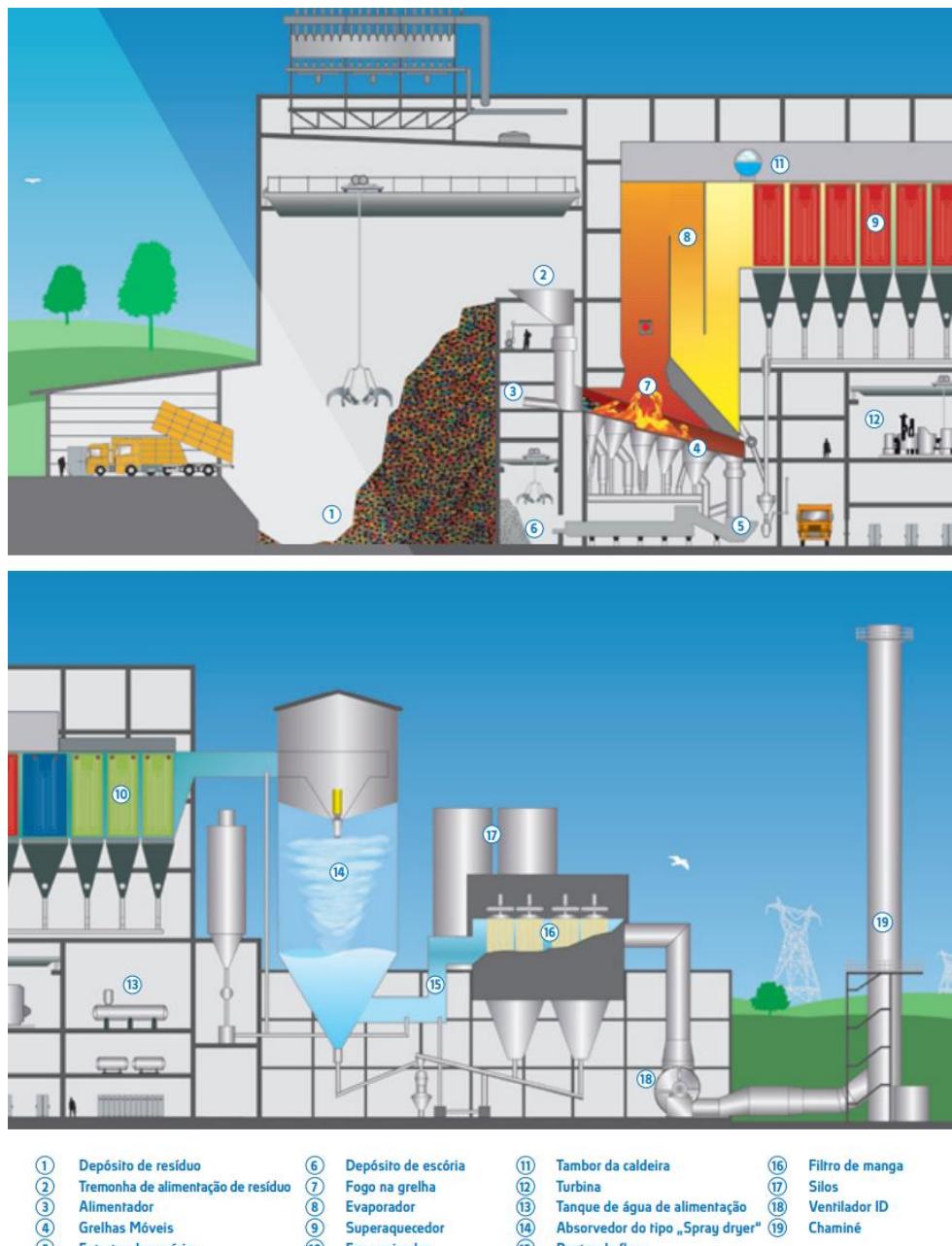
Comparado a aterros controlados e “lixões”, o aterro sanitário é a única disposição final regular, tendo em vista que os demais não fornecem a infraestrutura necessária para a proteção dos recursos naturais (SCHALCH; CASTRO; CÓRDOBA, 2015). Dentre as informações de destinações para os resíduos de serviços públicos de saneamento básico, não há apontamento de aterros controlados ou lixões no estado de São Paulo, mas há a nível nacional e, por mais que em menor porcentagem que as outras alternativas, ainda consiste em aproximadamente 14.000 toneladas no ano de 2020, segundo SINIR.

A nível estadual (SP) e nacional, a destinação ao tratamento é a segunda maior em percentual para os resíduos de serviços públicos de saneamento básico, de acordo com o SINIR. Apesar de não serem apresentados detalhamentos sobre os tipos de tratamentos adotados, segundo PNRS, as medidas de recuperação, reciclagem e/ou reaproveitamento são prioritárias para os resíduos sólidos. A única alternativa regulamentada para a destinação de lodo de

tratamento de esgoto é a reciclagem agrícola, onde a Resolução CONAMA nº 375/2006 (revogada pela Resolução CONAMA nº 478/2020) define os critérios e procedimentos. Além disso, existem diversos estudos em relação a incorporação do resíduo na produção de materiais para a construção civil, especialmente na fabricação de cerâmica e cimentos, sendo interessante pela exposição a altas temperaturas que reduzem os riscos sanitários, o desafio é a proporção a se utilizar em função da resistência mecânica desejada (GEWEHR, 2009).

Gewehr (2009) também apresenta o tratamento de incineração, que se baseia na decomposição térmica via oxidação, proporcionando a redução do volume do resíduo e redução, ou até mesmo eliminação, de sua toxicidade. Segundo Schalch, Castro e Córdoba (2015) um dos fatores a serem levados em consideração para aplicação da incineração é o volume de resíduos, pois os altos custos de operação só são compensatórios para tratamento de grandes volumes. O mesmo autor menciona a possibilidade de reaproveitamento energético, os sistemas denominados *waste-to-energy* (WTE), que permitem a geração de energia elétrica ou vapor d'água e são comumente utilizados nos Estados Unidos e Europa. A Figura 5 ilustra o sistema de um incinerador.

Figura 5 – Processo de incineração de resíduos



Fonte: Enfil (2013)

No Brasil, a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN) realizou o primeiro mapeamento sobre os potenciais de destinação dos resíduos sólidos urbanos para produção de energia em uma população de 100 milhões (48% do país), afirmando que as WTE têm potencial para, pelo menos, 114 usinas em 28 regiões metropolitanas, podendo atingir uma potência instalada de 2,3 GW e, principalmente, servindo como uma solução de saneamento das cidades (ABREN, 2021). Partindo-se do princípio dos grandes volumes de lodo que são gerados nas estações de tratamento de esgoto e do seu potencial calorífico, além da

necessária tendência de buscar-se alternativas de recuperação de resíduos e nos desafios do crescimento populacional, pensa-se que a incineração/recuperação energética seja uma solução atrativa de tratamento.

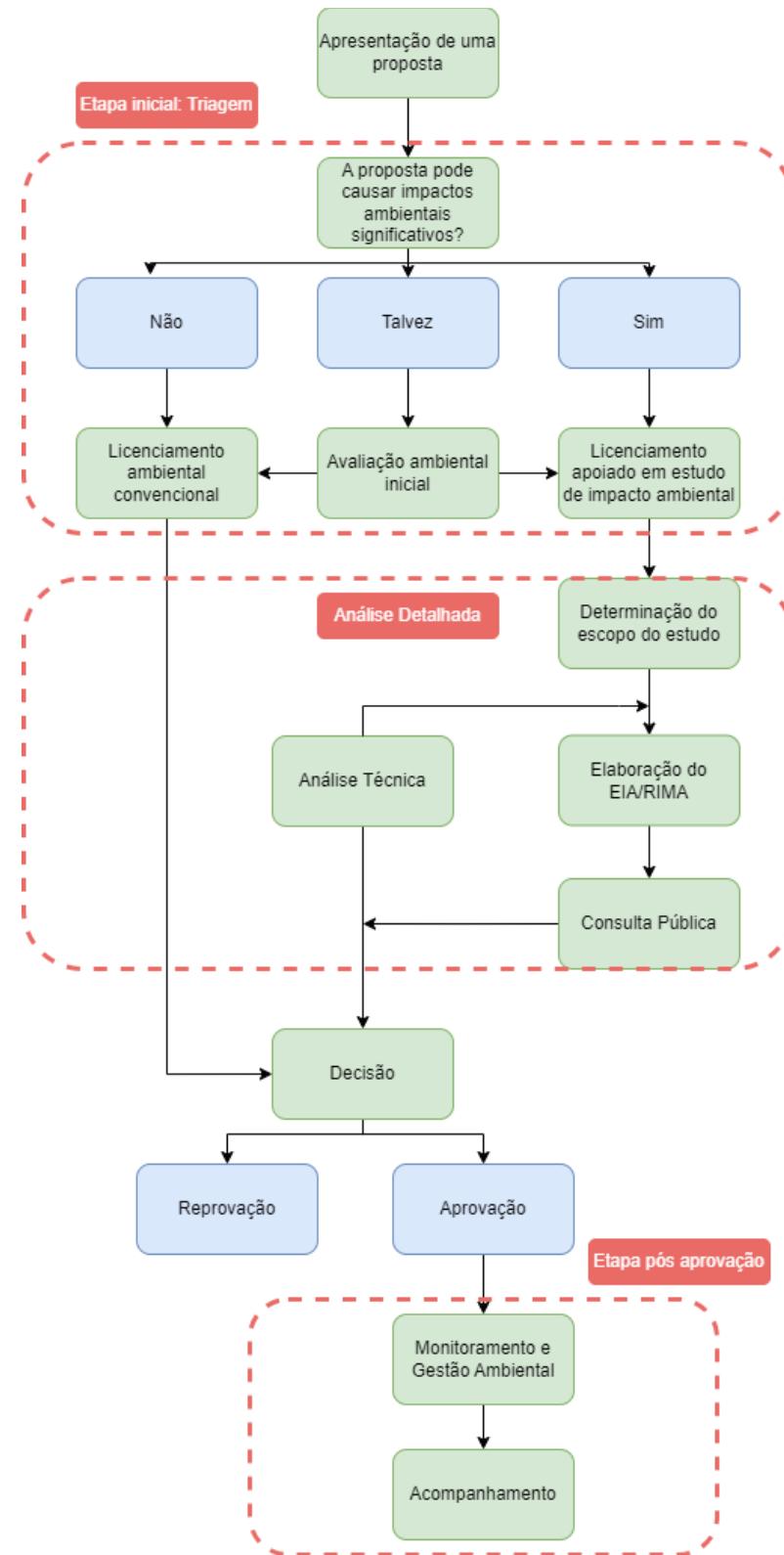
3.7. Avaliação dos impactos de resíduos de serviços públicos de saneamento básico

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) é instituída pela Lei Federal nº6.938/1981

“tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento sócio-econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana (...)"

A avaliação de impactos ambientais (AIA) é um dos instrumentos previstos na PNMA, assim como o licenciamento ambiental de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, dentre outros, a fim de atingir os objetivos estabelecidos. Caballero (2016) aponta que a Resolução CONAMA nº 1 de 1986 apresenta as diretrizes para utilização da AIA, trazendo uma lista de atividades que devem ser avaliadas perante elaboração de estudo de impacto ambiental (EIA) e respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA). A Figura 6 apresenta o processo de AIA.

Figura 6 – Processo de avaliação de impacto ambiental



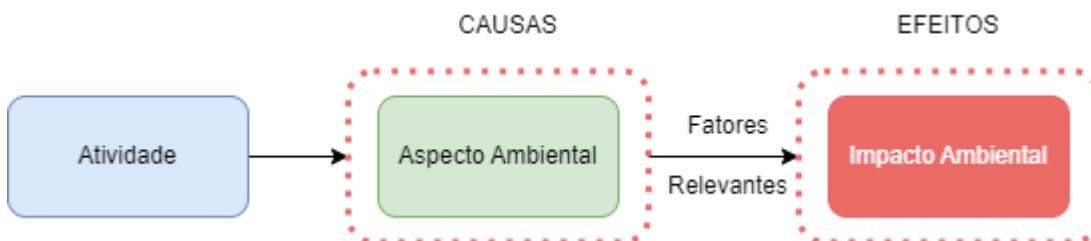
Fonte: Adaptado de Sánchez (2008)

Nos projetos de ETEs e aterro sanitários é necessário a elaboração de EIA/RIMA, com exceção aos aterros de pequeno porte que são passíveis de licenciamento simplificado, dispensando elaboração do estudo. Alternativas locacionais devem ser consideradas para que os impactos de instalação e operação da atividade sejam minimizados, além de apresentarem conformidade com o zoneamento definido pelo Plano Diretor (SCHALCH; CASTRO; CÓRDOBA, 2015).

Uma das metodologias aplicadas para avaliação de impacto são as redes causais, que consistem em diagramas para relacionar as influências de causas e efeitos de um sistema em determinado local. As denominadas Redes de Sorenson são a representação de diagrama de causa e efeito inserido em uma matriz de impactos (PERDICOÚLIS; GLASSON, 2006). Mendonça (2023) apresenta a relação de causa efeito conforme ilustrado na Figura 7, sendo o passo a passo dessa avaliação:

- 1) Identificação dos aspectos ambientais presentes no sistema
- 2) Identificação dos fatores relevantes a produção de efeitos nos aspectos (causas) levantadas no primeiro passo
- 3) Previsão dos efeitos (impactos ambientais)

Figura 7 – Relação causa e efeito



Fonte: Adaptado de Mendonça (2023)

Sendo assim, buscou-se avaliar os impactos ambientais ocasionados pela destinação final dos resíduos de serviços públicos de saneamento básico, mais especificamente dos lodos biológicos gerados nas estações de tratamento de esgoto, a partir da abordagem de diagrama de causa-efeito (Rede de Sorenson).

4. METODOLOGIA

O item em questão visa apresentar as características do local de estudo e os métodos empregados para se atingir os objetivos elencados no item 2.

4.1. Caracterização do local de estudo

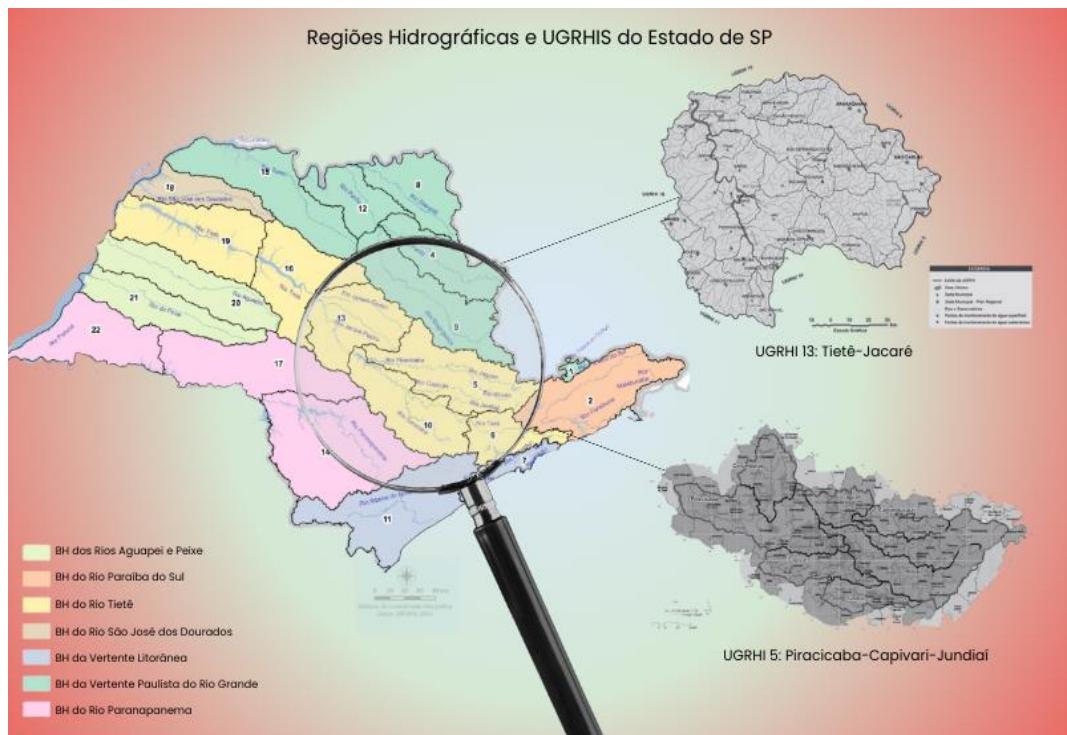
Em avaliações ambientais é de importância considerar as gestões a nível de bacias hidrográficas, tendo em vista a veiculação hídrica e interações ecossistêmicas que transcendem fronteiras locais. As Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) são estabelecidas segundo a Divisão Hidrográfica Nacional instituída pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) da Agência Nacional de Águas (ANA).

Para estudo de caso da geração e destinação dos resíduos de serviços públicos de saneamento básico de ETEs, em especial o lodo residual biológico, com base nos tipos de tratamento adotados, delimitou-se 4 municípios dentro de duas UGRHIs selecionadas, caracterizados nos subitens a seguir.

4.1.1. Caracterização das UGRHIs

O Estado de São Paulo está inserido em três regiões hidrográficas brasileiras, sendo elas a do Rio Paraná, do Atlântico Sudeste e do Atlântico Sul, refletindo em uma subdivisão de 7 regiões hidrográficas no estado. A Lei Estadual nº 16.337/2016 dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH), segregando a gestão em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos. As regiões hidrográficas e UGRHIs do Estado de São Paulo estão ilustradas na Figura 8, com foco nas UGRHIs 13 e 5, localizadas na região da Bacia Hidrográfica do Rio Tietê.

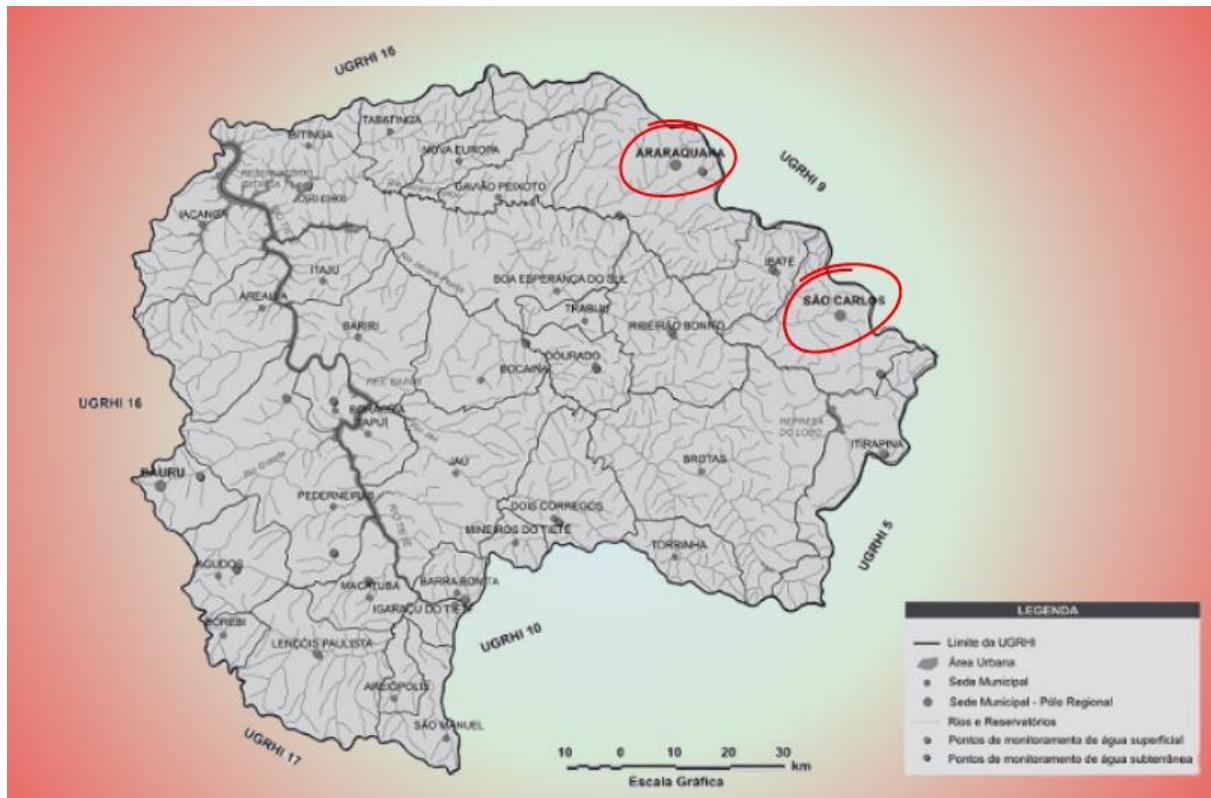
Figura 8 – Regiões hidrográficas e UGRHIs do Estado de São Paulo



Fonte: Adaptado de São Paulo (2017)¹; São Paulo (2017)²; São Paulo (2020).

A UGRHI 13, que representa a Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré, está localizada na região central do estado de São Paulo, abrigando cerca de 3,6% da população estadual e é composta por 34 municípios, dentre esses, dois dos municípios analisados no presente trabalho: São Carlos, que tem seu território dividido entre as UGRHIs 13 e 9, e Araraquara, que tem 100% do seu território dentro da UGRHI 13. A Figura 9 ilustra a UGRHI 13 e os respectivos municípios selecionados.

Figura 9 – Divisão por municípios da UGRHI 13, com destaque para Araraquara e São Carlos



Fonte: Adaptado de São Paulo (2017)².

A UGRHI é dividida em 6 sub-bacias, de acordo com a área de drenagem dos seus principais rios: Rio Tietê, Rio Jacaré-Guaçu e Rio Jacaré-Pepira. É abrangida pelos aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani, e a principal atividade econômica pela qual é representada está ligada à agroindústria (álcool, açúcar e processamento de cítricos). Os municípios selecionados são 2 dos maiores dentro da UGRHI e apresentam-se como referência em relação à presença de diversos setores industriais.

O diagnóstico do Plano da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré apresenta o Índice de Qualidade das Águas - IQA, dados apresentados pelo monitoramento da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB no Relatório da Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 13 de 2017, em que dois pontos (de doze analisados) foram classificados com desconformidades. O ponto classificado como ruim é localizado no Rio Monjolinho, receptor de esgoto do município de São Carlos, que teve 17,6% de carga remanescente em 2016, mesmo com a ETE Monjolinho em operação há alguns anos.

A UGRHI 5 - PCJ é constituída pelas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, tem 92,6% do seu território no estado de São Paulo e 7,4% no estado de Minas Gerais. A UGRHI é composta parcial ou integralmente por 50 municípios paulistas e 5 municípios

mineiros, apresentados na Figura 10. Os dois municípios selecionados, Jundiaí e Piracicaba, localizam-se no estado de São Paulo e têm 100% de seu território inserido na UGRHI em questão.

Figura 10 – Divisão por municípios da UGRHI 5



Fonte: Adaptado de São Paulo (2017)¹.

É composta por 7 sub-bacias principais: Piracicaba, Capivari, Jundiaí, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia. É abrangida pelos aquíferos Pré-Cambriano, Tubarão, Guarani e Serra Geral. As principais atividades econômicas são a agropecuária e a produção industrial; como exemplo, cita-se as indústrias sucroalcooleiras e setor metal-mecânico presente em Piracicaba e o parque industrial diversificado em setores de Jundiaí.

O Relatório da Situação dos Recursos Hídricos de 2017 das bacias PCJ apresenta, para o esgotamento sanitário, bons índices ($> 90\%$) entre 2013 e 2016 em relação ao esgoto coletado, no entanto, apresenta porcentagens regulares ($> 50\%$ e $< 90\%$) para os parâmetros esgoto tratado e eficiência do sistema de esgotamento.

4.1.2. Caracterização dos municípios

4.1.2.1. Araraquara

O município de Araraquara está localizado na região central do Estado de São Paulo, tem área territorial de 1.003,65 km² (IBGE, 2022) e população estimada em 240.542 habitantes (IBGE, 2021). Ao que tange o presente trabalho, em relação ao saneamento básico, o Plano Municipal de Saneamento de 2014 apresenta os seguintes indicadores:

- Nível de atendimento de coleta de resíduos (2010): 99,96%, citando que a disposição final dos resíduos coletados é feita no aterro sanitário no município de Guatapará, 50 km de distância de Araraquara;
- Nível de atendimento de coleta de esgoto sanitário (2010): 98,89%, citando que 100% do esgoto coletado é tratado nas ETEs Araraquara, Bueno e Bela Vista, de acordo com o DAAE. A ETE Araraquara é responsável por aproximadamente 99% do tratamento de esgoto do município.

4.1.2.2. São Carlos

O município de São Carlos está localizado na região central do Estado de São Paulo, com área territorial de 1.136,907 km² (IBGE, 2022) e população estimada de 256.915 habitantes (IBGE, 2021). O sistema de esgotamento sanitário de São Carlos, segundo o Plano Municipal de Saneamento Básico de São Carlos (2012), conta com 98% da população atendida com coleta e afastamento de esgotos, e que a partir do início da operação da ETE Monjolinho em 2009, o volume de esgoto tratado do município foi para 85%.

4.1.2.3. Jundiaí

O município de Jundiaí tem área territorial de 431,204 km² (IBGE, 2022) e população estimada de 426.935 habitantes (IBGE, 2021). Segundo o DAE Jundiaí, o sistema de esgotamento sanitário atende 98,23% da população urbana com coleta de esgoto, em que 100% do esgoto coletado é tratado. Além disso, o Plano Municipal de Saneamento Básico de Jundiaí (2017) apresenta que a coleta de resíduos sólidos atende 100% da população urbana e rural do município, dispostos em aterro sanitário.

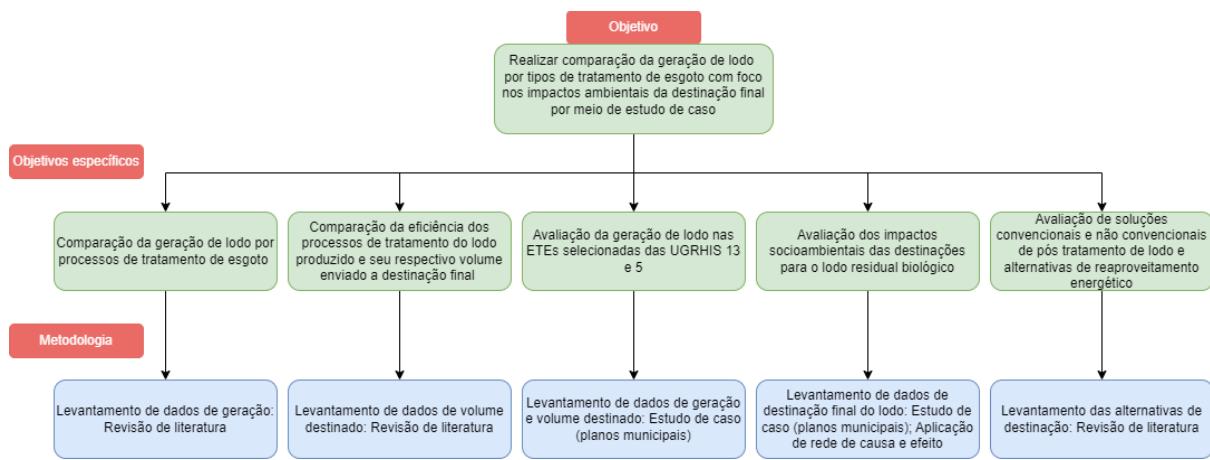
4.1.2.4. Piracicaba

O município de Piracicaba tem área territorial de 1.378.069 km² (IBGE, 2021) e população estimada de 410.275 habitantes (IBGE, 2022). Segundo o PMGIRS (2019), 99,95% da população urbana é atendida com coleta de esgoto, e 100% do esgoto coletado é tratado. Além disso, de acordo com o SNIS (2021), a população urbana é 100% atendida com coleta de resíduos domiciliares, enquanto a população rural é 99,86% atendida.

4.2. Métodos aplicados aos objetivos

O fluxograma da Figura 11 apresenta a relação de cada metodologia aplicada ao objetivo específico que se buscou atingir.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia aplicada



A revisão de literatura é crucial ao levantamento de dados de geração de lodo por processos de tratamento de esgoto, seus respectivos volumes destinados, alternativas de destinação final, bem como o uso de ferramentas de avaliação dos impactos gerados pela atividade. O estudo de caso, baseado nos planos municipais disponíveis para consulta pública, como o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), permite o levantamento de dados de forma local, proporcionando comparativo entre medidas adotadas em distintos municípios de uma mesma UGRHI, assim como, de UGRHIs distintas, visando o que dispõe as legislações a respeitos dos instrumentos de política ambiental.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente item tem por objetivo apresentar a caracterização dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário de cada um dos municípios das UGRHIs selecionadas ao estudo de caso: Araraquara e São Carlos (UGHRI 13), Jundiaí e Piracicaba (UGHRI 5), com subtópico de foco nas informações de geração, tratamento e destinação final do lodo residual biológico. Discute-se, ainda, a convergência ou divergência entre os dados trabalhados e os impactos socioambientais das destinações adotadas.

5.1. Tratamento de esgoto adotado

5.1.1. UGRHI 13

5.1.1.1. Araraquara

O sistema de esgotamento sanitário de Araraquara, de acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), atende a praticamente 100% da população urbana com a coleta de esgoto, sendo as áreas não servidas constituídas majoritariamente por loteamentos incipientes. Existem três estações de tratamento de esgoto no município: ETE Bueno de Andrade, ETE Bela Vista e ETE Araraquara, propiciando tratamento de 100% do que é coletado (ARARAQUARA, 2014).

Segundo o Departamento Autônomo de Água e Esgoto do município de Araraquara (DAAE) as atividades dos sistemas de coleta e tratamento de esgotos são de responsabilidade da Unidade de Tratamento de Esgotos, da Gerência de Tratamento de Água e Esgotos, conforme estabelecido na Lei Municipal nº 8.868/2017. O município de 240.542 habitantes (IBGE, 2021) compreende a ETE Bueno de Andrade, no Distrito Bueno de Andrade, com início de operação em 1997 em virtude de parceria entre o DAAE e a Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, atendimento de 480 habitantes e vazão diária de 40 a 45 m³; A ETE Bela Vista, no assentamento Bela Vista, tratando-se de ETE compacta para tratamento do esgoto dos 53 lotes existentes; Por fim, a ETE Araraquara, responsável pelo atendimento de aproximadamente 99% do esgoto do município (DAAE, 2023).

O afastamento do esgoto se dá através da Bacia Ribeirão das Cruzes e Bacia do Córrego do Ouro, contando com a presença de sete estações elevatórias para recalque em locais de topografia desfavorável. A ETE Araraquara encontra-se às margens do Ribeirão das Cruzes,

próxima a rodovia Comandante João Ribeiro Barros (SP-255), possui dois módulos de tratamento secundário com capacidade para 400 L/s cada, além de tratamento preliminar comum aos dois módulos (ARARAQUARA, 2014), a Figura 12 representa sua localização.

Figura 12 – Vista aérea da ETE Araraquara



Fonte: Google Earth (2023)

De acordo com o PMSB (2014), em 1997 desenvolveu-se o projeto executivo da ETE Araraquara, sob responsabilidade da SEREC - Serviços de Engenharia Consultoria Ltda, consistindo em sistema de lagoas aeradas, seguidas de lagoas de sedimentação, com eficiência de remoção de DBO igual ou superior a 80%. No projeto previu-se 3 módulos de tratamento, antecedidos de 2 grades mecanizadas e 1 calha Parshall, assim como procedem de uma calha parshall de saída (ARARAQUARA, 2014). A implantação inicial considerou-se dois módulos, onde as demais unidades componentes estão representadas na

Tabela 7. Cada um dos módulos foi projetado para as seguintes características:

- Vazão média: 400 L/s
- Carga afluente média: 7258 kgDBO/dia (210 mgDBO/L)
- População equivalente: 134.000 hab

Tabela 7 – Unidades previstas nos dois módulos iniciais de tratamento

3 Caixas de Areia
1 Caixa Divisora de Vazão
2 Lagoas Aeradas (125m x 240m x 4m)
2 Lagoas de Sedimentação (125m x 125m x 4m)
2 Lagoas de Lodo (60m x 125m x 2m)
1 Casa de Operação
1 Subestação de Energia Elétrica

Fonte: Araraquara (2014)

O projeto adotou como horizonte os anos de 1996, 2006 e 2016, prevendo as vazões médias de 613 L/s, 818 L/s e 1160 L/s, respectivamente. Entretanto, dados operacionais de 2011 revelaram a vazão média de 600 L/s, este fato justifica-se pelo projeto tomar como base dados censitários da época, que apresentavam a taxa geométrica de crescimento anual da população superior ao crescimento atingido pela população do município. Sendo assim, apenas os dois módulos iniciais do projeto que operam até os dias atuais (ARARAQUARA, 2014).

A ETE Araraquara iniciou operação em outubro de 1999 e atende a uma vazão média de 650 L/s, com período de pico por volta das 14h e lançamento no Córrego Ribeirão das Cruzes, conforme ilustrado na Figura 13. O Ribeirão das Cruzes é classe 4, segundo Resolução CONAMA nº397/2008, ele desemboca no rio Jacaré-Guaçu, afluente direto do rio Tietê (ARARAQUARA, 2014).

Figura 13 – Lançamento no corpo receptor realizado pela ETE Araraquara



Fonte: DAAE (2023)

O sistema de tratamento preliminar, ilustrado na Figura 14, é composto por gradeamento grosso (espaçamento 20 mm) com processo de remoção automática de detritos, calha Parshall, desarenadores com raspador do tipo circular/remoção de resíduos através de roscas transportadoras helicoidais e peneiras rotativas estáticas (espaçamento 6 mm) com remoção de resíduos por esteiras (ARARAQUARA, 2014).

Figura 14 – Sistema de tratamento preliminar ETE Araraquara: a) gradeamento, b) desarenador, c) peneiras.



Fonte: DAAE (2023)

O sistema de tratamento secundário, ilustrado na Figura 15, consiste em lagoa de aeração seguido de lagoa de sedimentação. A lagoa de aeração tem introdução de oxigênio através de 16 aeradores dos tipos submersos e propulsores, possui volume de 103.700 m³, com dimensões de 240 m de comprimento, 125 m de largura e 4,7 m de profundidade, possibilitando um tempo de detenção hidráulica de aproximadamente 3 dias. A lagoa de sedimentação possui volume de 57.600 m³, sendo 130 m de comprimento, 125 m de largura e 4 m de profundidade, aproximadamente 1,7 dias de detenção (ARARAQUARA, 2014).

Figura 15 – Sistema de tratamento secundário ETE Araraquara: a) lagoa de aeração, b) lagoa de sedimentação.



Fonte: DAAE (2023)

Os resíduos sólidos resultantes das operações unitárias e processos do tratamento preliminar são, em sua maioria, sólidos grosseiros da primeira etapa de gradeamento, podendo-se citar canetas, aparelhos de barbear, celulares e sacolas plásticas, e materiais do peneiramento, como restos de comida, estopas e preservativos; a disposição desses resíduos é o aterro sanitário. No tratamento secundário, ocorre a formação e decantação de lodo na lagoa de sedimentação, que são dragados para realização das etapas de tratamento e destinação final (ARARAQUARA, 2014).

O PMSB de Araraquara, publicado em 2014, traz novas projeções com horizonte de projeto para 2035, estas consideraram uma taxa de evolução da população do município em torno de 1,10% ao ano, e os parâmetros hidráulicos básicos (como coeficientes de vazão máxima horária e diária; taxa de infiltração; consumo per capita), somando-se à vazão de entrada da ETE os lodos das Estações de Tratamento de Água (ETA), que são direcionados às redes coletoras de esgoto, a partir de informações de estudo da Hidrosan Engenharia, elaborado em 2007 (ARARAQUARA, 2014). Conforme conclusões do plano, a Tabela 8 apresenta a evolução da vazão de esgoto a cada 5 anos, de 2020 a 2035.

Tabela 8 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Araraquara

Ano	População (hab)	Vazões (L/s)			
		Mínima	Média	Máxima diária	Máxima horária
2020	230.566	345	718	812	1081
2025	242.327	355	741	839	1116
2030	262.188	365	763	864	1149
2035	262.438	376	786	888	1182

Fonte: Araraquara (2014)

A partir dessas estimativas, o PMSB (2014) definiu média vazão final em 800 L/s e também apresentou diversos estudos de alternativas para futura ampliação da capacidade de atendimento da ETE Araraquara, pensando-se nas vantagens e desvantagens que o tipo de tratamento empregado no terceiro módulo pode apresentar, seja do ponto de vista de área, custos ou operação. Além disso, o plano ressalta a importância de buscar-se melhoria contínua no tratamento, para além das exigências legais de lançamento no corpo receptor, inclusive em medidas que permitam a redução na produção de lodo e avaliação de tratamentos e aproveitamentos adequados para os gases gerados no processo.

De acordo com informações externas, obtidas por meio de contato com o DAAE, atualmente a ETE Araraquara atende a toda a cidade, aproximadamente 240 mil habitantes, alinhando-se com a informações obtidas via IBGE, apresentadas no item **4.1.2.1**. Opera com vazão média de 700 L/s, com nível preliminar (gradeamento grosso, desarenador e peneira) e dois módulos de nível secundário (composto por lagoa de aeração e lagoa de sedimentação), com tempo aproximado de detenção hidráulica de 5 dias e efluente tratado lançado no Ribeirão das Cruzes com DQO por volta de 50 mg/L. Pensa-se que o tempo de detenção hidráulica informado representa as duas etapas do tratamento, lagoa de aeração + lagoa de sedimentação, apresentando coerência com o dado do PMSB (2014), de aproximadamente 4,7 dias.

É interessante o Plano Municipal de Saneamento Básico apresentar informações desde a concepção do projeto da ETE, até a revisão das estimativas futuras, com discussão de diferentes aplicações possíveis para a ampliação do tratamento. Além disso, é positivo apontar dentre os objetivos de melhoria, a redução na produção de lodo e avaliação de tratamentos que aproveitem os gases gerados no processo, alinhando-se às diretrizes trazidas pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Todavia, o plano é datado de 2014, podendo apresentar dados

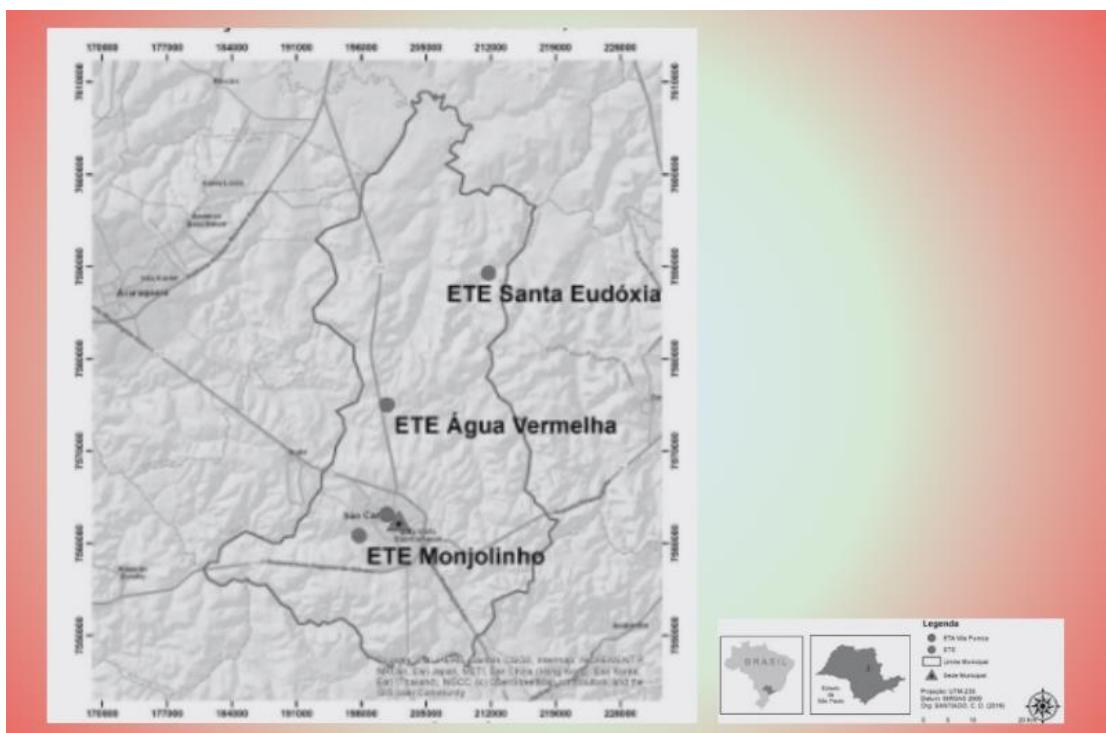
que sofreram modificações ao longo dos 9 anos até os dias atuais, como, por exemplo, a previsão de vazões médias acima de 800 L/s nas projeções de 2020 e 2025, que contrastam com o dado operacional da ETE de 700 L/s em 2023.

O tópico seguinte traz os dados relativos à geração e manejo do lodo, abordando na seção de Araraquara informações do DAAE e PMSB, assim como o presente subtópico, com inclusão do PMGIRS, tendo em vista o foco na geração e gerenciamento do semissólido.

5.1.1.2. São Carlos

Os serviços relativos a afastamento e tratamento de esgotos sanitários são realizados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos - SAAE (SÃO CARLOS, 2019), no site da companhia apresenta-se três estações de tratamento de esgoto, sendo elas, ETE Monjolinho, ETE Santa Eudóxia e ETE Água Vermelha (SAAE, 2023), ilustradas na Figura 16. A ETE Monjolinho, responsável pelo tratamento de toda área urbana, é apresentada como de alta tecnologia e baixo custo, foi inaugurada em 2008, representando grande avanço para o município e a região, tendo em vista que até então o lançamento de todo o esgoto sanitário era dado em corpos hídricos, sem tratamento (SÃO CARLOS, 2009).

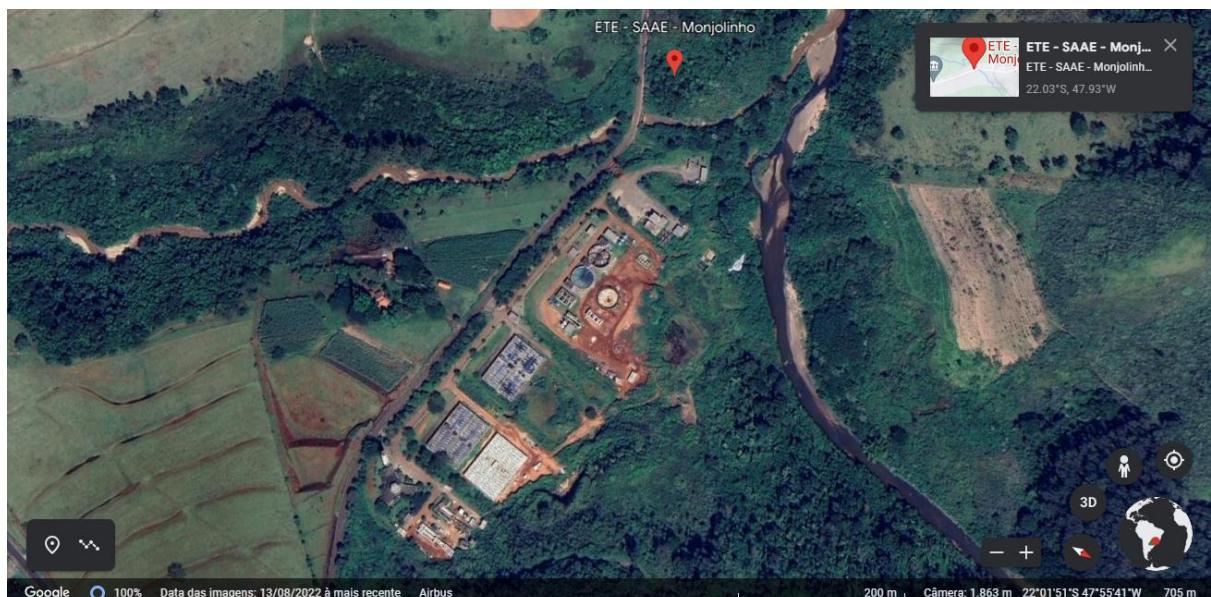
Figura 16 – Localização das ETEs de São Carlos – SP



Fonte: Adaptado de São Carlos (2019)

As ETEs Água Vermelha e Santa Eudóxia atendem a distritos em áreas mais afastadas da malha urbana, estão localizadas na Bacia Hidrográfica do Mogi-Guaçu, tendo lançamento no córrego Itararé, afluente do Rio Quilombo e no Ribeirão das Araras, respectivamente, ambos classe II (SAAE, 2023). Apenas a ETE Monjolinho encontra-se na Bacia Tietê-Jacaré, sendo responsável pelo maior volume de tratamento, uma vez que atende toda a malha urbana (SÃO CARLOS, 2019), com redes coletoras, interceptores e emissários com uma extensão aproximada de 1100 km (SÃO CARLOS, 2009). A ETE Monjolinho se encontra na estrada vicinal Cônego Washington José Pêra, conforme apresenta a Figura 17, seu lançamento se dá em rio classe IV, o Ribeirão Monjolinho.

Figura 17 – Vista aérea da ETE Monjolinho



Fonte: Google Earth (2023)

Segundo o Relatório de Impacto Ambiental - RIMA, do Aterro Sanitário de São Carlos, de 2009, a ETE Monjolinho opera com vazão de 600 L/s. O PMGIRS (2019), apresenta vazões de projeto de 2005 a 2055, de acordo com informações do SAAE, estas estão apresentadas na Tabela 9, além disso afirma o volume de 18.921.600 m³ de esgoto no município de São Carlos no ano de 2019, corroborando com a informação de vazão do relatório anterior (600 L/s = 51.840 m³/dia = 18.921.600m³/ano), porém ressaltando que as ETEs, apesar de serem projetadas apenas para esgoto doméstico, recebem, pontualmente, o lançamento de efluentes industriais.

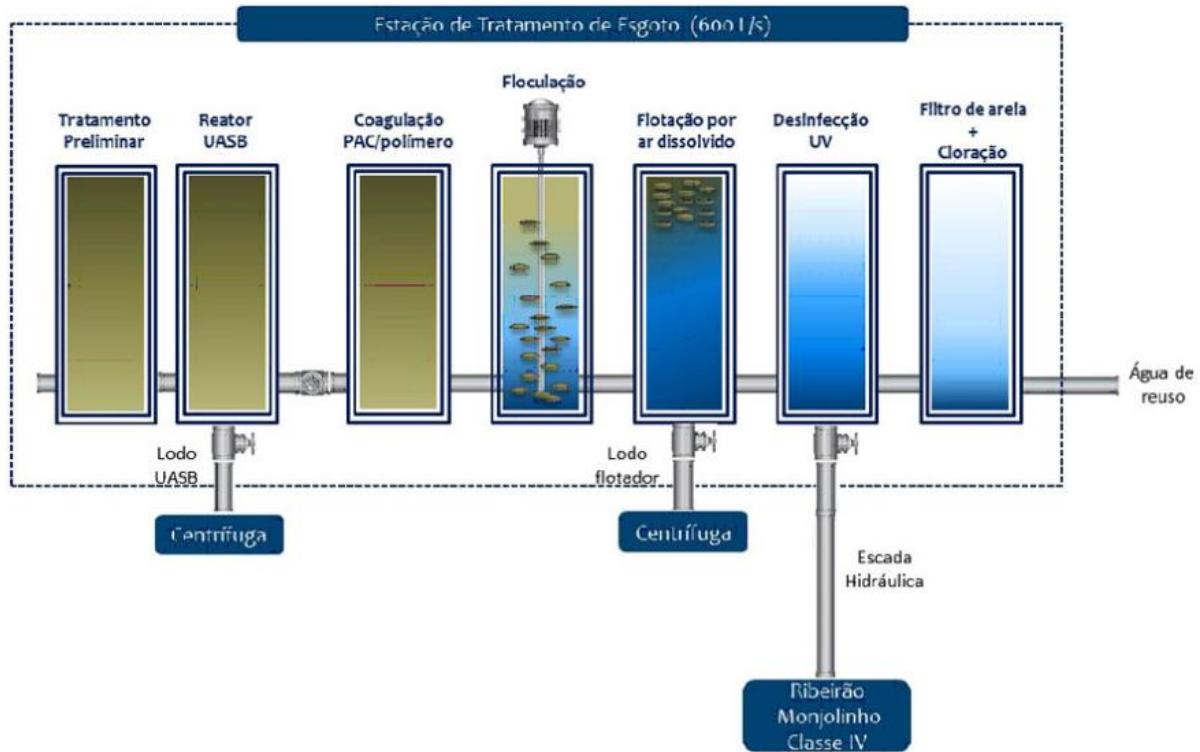
Tabela 9 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Monjolinho

Ano	População (hab)	Vazões (L/s)			
		Mínima	Média	Máxima diária	Máxima horária
2005	202.311	282	481	560	818
2015	258.451	372	635	740	1057
2031	380.882	566	954	1100	1575
2055	500.000	750	1272	1463	2100

Fonte: SAAE apud São Carlos (2012)

O tratamento na ETE Monjolinho é composto por gradeamento grosso, gradeamento fino e remoção de areia e gordura (tratamento preliminar); dois reatores UASB funcionando em paralelo, mistura rápida e floculação com adição de coagulantes (tratamento secundário); sistema de desinfecção com radiação ultravioleta (tratamento terciário) (SÃO CARLOS, 2012). Entretanto, na última atualização do Plano Municipal de Saneamento Básico, em 2012, constata-se que o tratamento terciário se encontra em fase de implantação. A Figura 18 apresenta as operações unitárias e processos da ETE Monjolinho segundo SAAE.

Figura 18 – Etapas de tratamento da ETE Monjolinho



Fonte: SAAE (2023)

O Plano Municipal de Saneamento Básico de São Carlos, apresenta descrição da ETE, porém sem grandes detalhamentos sobre as operações unitárias e processos envolvidos e projeto de concepção, além disso, apresenta projeções para cenários futuros e estimativas de volumes de geração. Tratando de atualização, o mesmo é datado de 11 anos atrás, podendo apresentar dados equivocados para a situação atual, entretanto para o tratamento de esgoto vê-se boa correlação com as informações apresentadas em épocas distintas, como na página online do SAAE, onde assume-se que as informações são de 2023 apesar da ausência de data de edição, e demais relatórios municipais, como o RIMA do projeto de aterro sanitário de São Carlos de 2009 e o PMGIRS de 2019, ressalta-se que as mesmas referências são utilizadas para as discussões de geração de lodo do município no tópico adiante.

5.1.2. UGRHI 5

5.1.2.1. Jundiaí

A coleta e o afastamento de esgoto de Jundiaí são realizados pela DAE Jundiaí, empresa de economia mista que tem como principal acionista a Prefeitura de Jundiaí e foi criada a partir

da Lei Municipal nº 5.307/99. Segundo o Instituto Trata Brasil (2020), 98,23% do município é atendido com redes coletoras de esgoto. De acordo com a DAE (2023), o investimento no desenvolvimento do saneamento do município foi consequência de iniciativas para a despoluição do Rio Jundiaí, envolvendo o governo estadual, a prefeitura, a DAE e a CETESB. As obras de despoluição foram iniciadas em 1985, assim como a constituição do sistema de afastamento de esgoto de Jundiaí, formado por coletores tronco, interceptores e emissários.

Em relação ao serviço de tratamento de esgoto, o Instituto Trata Brasil (2020) apresenta que 100% do esgoto coletado é tratado. A DAE informa que devido à indisponibilidade financeira da prefeitura, optou-se pela concessão do serviço para empresas particulares; com isso, em 1996, a Companhia de Saneamento de Jundiaí (CSJ) venceu a concorrência pública para construção e operação da ETE, que foi inaugurada em 1998.

De acordo com o PMSB, existem três sistemas coletivos de esgotamento sanitário no município, e suas respectivas ETEs estão apresentadas na Figura 19. Além disso, nas áreas rurais onde não há rede coletora de esgoto, os sistemas individuais são comumente empregados (JUNDIAÍ, 2017). Os sistemas são:

- Sistema coletivo 1: atende as bacias hidrográficas dos rios Guapeva e Jundiaí, e parcialmente as bacias hidrográficas dos rios Jundiaí Mirim e Capivari e o Ribeirão Caxambu. É constituído por redes coletoras, interceptores, emissário, sete estações elevatórias de esgoto (EEE) e a ETE Jundiaí (ETEJ);
- Sistema coletivo 2: atende o bairro Fernandes, parte da bacia hidrográfica do rio Capivari. Constituído por redes coletoras, interceptores, uma EEE e a ETE Fernandes;
- Sistema coletivo 3: atende parte das sub bacias São José, Rio Acima, Corrupira e calha do Rio Capivari, pertencentes à bacia do Rio Capivari. Constituído por redes coletoras, interceptores, uma EEE e a ETE São José.

Figura 19 – Localização das principais ETEs e EEEs de Jundiaí



Fonte: Jundiaí (2017)

De acordo com a CSJ (2023), a ETE Jundiaí é responsável pelo tratamento de 99% do esgoto coletado no município, que representa 98% do montante gerado. A DAE apresenta que os 2% de esgoto que não eram coletados, concentrados na zona rural, passaram a ser atendidos nos anos de 2012 e 2013, com a inauguração das ETEs São José e Fernandes, referentes aos sistemas coletivos 2 e 3 apresentados anteriormente. Destaca-se ainda que os lodos de esgoto gerados nas ETEs São José e Fernandes são encaminhados para a ETEJ, via caminhão, para receber tratamento (JUNDIAÍ, 2017).

A ETE Jundiaí está localizada às margens do Rio Jundiaí, mais próxima à zona rural do município, e a vista aérea da ETE está apresentada na Figura 20. De acordo com a CSJ (2023), a capacidade de tratamento da ETE é de 1.530 L/s, com vazão máxima de 2.520 L/s durante seu pico e vazão média atual de 1.100 L/s. Além disso, apresenta-se que a capacidade de tratamento em termos de carga orgânica é de 90 tonDBO/dia e que o sistema opera atualmente com eficiência de 95% de remoção da carga orgânica, e o total de lodo dragado é de 4500 ton/mês. O sistema de tratamento da ETEJ apresenta gradeamento, estação elevatória,

desarenadores, lagoas aeradas de mistura completa, lagoas de decantação e desidratação do lodo (JUNDIAÍ, 2017).

Figura 20 – Vista aérea da ETE Jundiaí



Fonte: Google Earth (2023)

O sistema de tratamento preliminar da ETEJ é composto por gradeamento, constituído de grades grossas e médias que retém os resíduos sólidos, que são dispostos em aterro sanitário. É seguido por uma estação elevatória de bombas submersíveis com medição de vazão à jusante, que levam o esgoto para os desarenadores.

O tratamento biológico é apresentado pela CSJ (2023) como biológico aeróbio, sendo composto por lagoa de aeração com difusores flutuantes de membrana. Os difusores localizam-se no fundo da lagoa de aeração, fornecendo oxigênio e agitação para as bactérias aeróbias, e a lagoa apresenta volume de 450.000 m³. Segue-se para a lagoa de decantação, na qual é formado o lodo da ETEJ. A lagoa tem capacidade de 352.000 m³ e, após a etapa de decantação, o efluente é enviado para o corpo receptor. O lodo gerado nas lagoas é enviado para processo de desidratação.

O PMSB de Jundiaí apresenta horizonte de projeto de 20 anos, sendo o planejamento realizado até o ano de 2036, e projeção populacional com crescimento de cerca de 1% ao ano. Em relação ao sistema de esgotamento sanitário, foram adotados parâmetros como consumo *per capita*, coeficiente de retorno, extensão de rede coletora, taxa de infiltração e contribuição

de DBO *per capita*, para a estimativa das vazões durante o horizonte, que estão apresentadas na Tabela 10 (JUNDIAÍ, 2017).

Tabela 10 – Vazões previstas de esgoto afluente à ETE Jundiaí

Ano	População (hab)	Vazões (L/s)		Carga orgânica (kg/dia)
		Média	Máxima	
2020	406.695	1.180	1.733	54.920
2026	420.511	1.232	1.808	57.924
2030	427.086	1.261	1.848	59.672
2036	431.596	1.283	1.881	60.854

Fonte: Jundiaí (2017)

Em relação à capacidade da ETE Jundiaí em termos de vazão e carga orgânica, o PMSB apresenta que, durante todo o horizonte do projeto, a ETE apresenta um saldo positivo em comparação às projeções realizadas. Como exemplo, no ano de 2036 prevê-se vazão média de 1.227 L/s enquanto a ETE tem capacidade de 1.530 L/s, e carga orgânica de 60.303 kgDBO/dia, enquanto a ETE tem capacidade de 90.000 kgDBO/dia. No entanto, a ETE pode necessitar alterações em seu sistema de tratamento para atender o enquadramento do corpo receptor. É citado pelo PMSB a alteração do enquadramento do Rio Jundiaí da classe IV para classe III, e com isso, o sistema de tratamento atual não atenderia os parâmetros legais de lançamento do efluente (JUNDIAÍ, 2017).

5.1.2.2. Piracicaba

A operação do sistema de esgotamento sanitário de Piracicaba é realizada pela Águas de Mirante, a partir de concessão pública de Parceria Público-Privada com o Serviço Municipal de Água e Esgoto - SEMAE, assinado em 2012. De acordo com a página *online* da Águas de Mirante, o sistema municipal conta com 24 estações de tratamento de esgoto, em que 100% do esgoto coletado do município é tratado. O PMGIRS, por outro lado, traz a informação de que o município conta com 26 estações de tratamento, evidenciando uma divergência entre as informações. Como ambas as fontes não apresentam a relação das estações ou esclarecem se estão contabilizando estações em implantação ou futuras, não é possível concluir a quantidade existente (PIRACICABA, 2019).

Para a avaliação de geração de lodo, a ETE Bela Vista foi selecionada como referência por apresentar a maior vazão dentre as principais estações; com vazão de 436 L/s e atendimento de cerca de 165.000 habitantes, aproximadamente 40% da população municipal (ÁGUAS DE MIRANTE, 2023). A ETE foi inaugurada em 2013, está localizada ao lado do rio Piracicaba e o sistema é composto por gradeamento, desarenador, tratamento biológico com tanques de aeração e decantadores secundários, tanque de contato para desinfecção do efluente e etapa de desidratação do lodo, segundo o PMGIRS (PIRACICABA, 2019). A vista aérea da ETE Bela Vista é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Vista aérea da ETE Bela Vista



Fonte: Google Earth (2023)

Não foi possível levantar o detalhamento do projeto da ETE Bela Vista junto à empresa responsável pela operação. No entanto, com base em revisão bibliográfica, assume-se que os resíduos sólidos retirados no tratamento preliminar, composto por gradeamento seguido de desarenador, são dispostos em aterro sanitário. Além disso, com base na Figura 21, nota-se que os tanques de aeração são retangulares seguindo para decantadores secundários circulares. A etapa de desidratação do lodo será abordada no tópico 5.2.2.2.

O PMSB de Piracicaba apresenta horizonte de projeto de 30 anos, sendo o planejamento realizado até o ano de 2040. Para a projeção populacional, dividiu-se a área municipal em 19 bacias de esgotamento. A projeção para a bacia de esgotamento Bela Vista, uma das 12 bacias

de esgotamento da margem esquerda do Rio Piracicaba, está apresentada na Tabela 11 (PIRACICABA, 2010).

Tabela 11 – Vazões previstas de esgoto afluente à bacia de esgotamento Bela Vista

Ano	População atendida (hab)	Vazões (L/s)			Carga orgânica (kg/dia)
		Média	Máxima diária	Máxima horária	
2025	6.352	17,09	24,45	28,86	343,01
2030	6.581	17,64	25,26	29,83	355,37
2035	6.756	18,07	25,89	30,58	364,82
2030	6.926	18,48	26,50	31,31	374,00

Fonte: Piracicaba (2010)

Devido à data de publicação do PMSB, este apresenta que a ETE de maior porte do município é a ETE Piracicamirim. Pode-se explicar então a divergência entre os valores de vazão projetados para a bacia da Bela Vista em comparação à vazão atual da ETE Bela Vista, uma vez que esta foi inaugurada em 2013; assume-se que a partir da instalação da nova ETE, foi realizada uma reorganização das bacias de esgotamento de forma que a maior contribuição fosse encaminhada para a ETE Bela Vista, já que apresenta maior capacidade. Considerando que não houve publicação de uma revisão do plano, não foi possível acessar as vazões de projeto, cargas orgânicas tratadas e geração de lodo com as instalações que estão em operação atualmente.

5.2. Geração, tratamento e destinação final do lodo

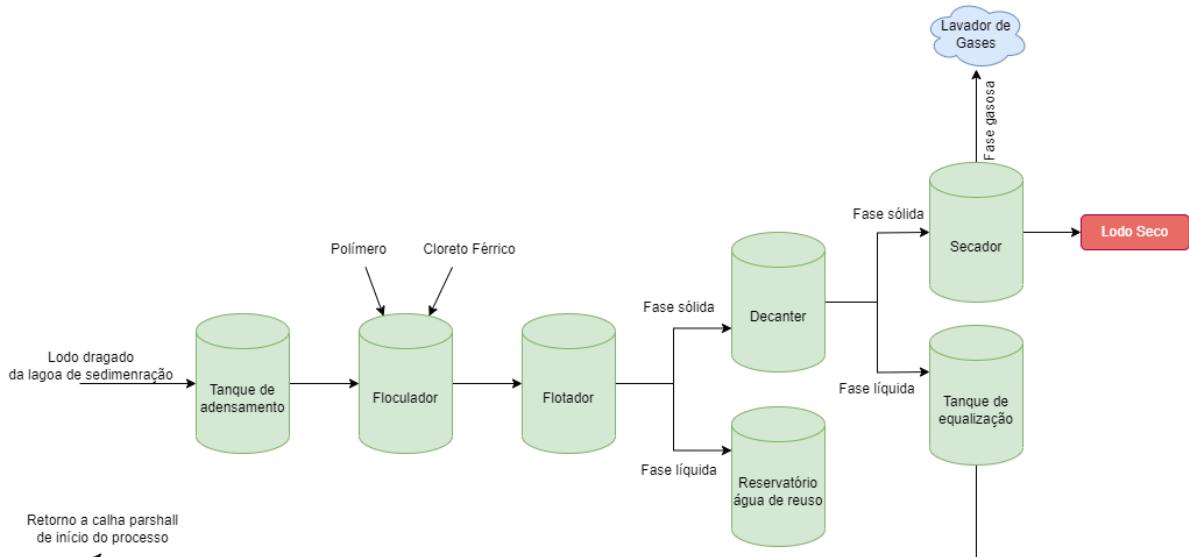
5.2.1. UGRHI 13

5.2.1.1. Araraquara

No sistema de tratamento da ETE Araraquara, o lodo é gerado nas lagoas de sedimentação e removido por meio de dragagem por balsa aspiradora automatizada com vazão de 70 m³/h. Esse lodo é um resíduo semissólido com 99,5% de umidade, portanto necessita de

tratamento que proporcione sua secagem (ARARAQUARA, 2013), a Figura 22 ilustra as etapas desse processo de tratamento.

Figura 22 – Tratamento do lodo biológico da ETE Araraquara



Fonte: Adaptado de DAAE (2023)

Inicialmente, o lodo é direcionado para um tanque de equalização com capacidade de 400 m³, equipado com agitadores, com a finalidade de promover a homogeneização. Em seguida, o lodo é bombeado para o tanque de floculação, onde são adicionados polímero e cloreto férrico, com o intuito de obter um melhor adensamento. Por meio da ação da gravidade, o resíduo é direcionado para o flotador, etapa na qual ocorre a primeira separação das fases sólida e líquida (ARARAQUARA, 2013).

O sólido é então bombeado para um decanter centrífugo, enquanto a fase líquida passa por processos de filtração e cloração antes de ser armazenada em um tanque de 100 m³. Essa água é utilizada como fonte de reuso para a higienização do próprio sistema. No decanter, também ocorre a separação de uma fase líquida, que é redirecionada para um tanque de equalização de 5 m³ e bombeada novamente para a etapa inicial do processo. Por outro lado, a fase sólida proveniente do decanter é encaminhada para um processo de secagem térmica a 300°C, resultando em um material com teor de umidade de aproximadamente 20%. O sistema de desaguamento e secagem térmica é apresentado na Figura 23 (ARARAQUARA, 2013).

Figura 23 – Sistema de desaguamento e secagem térmica do lodo ETE Araraquara



Fonte: Araraquara (2014)

O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) foi desenvolvido em 2013 e descreve a geração diária de 10 m³ de lodo seco na ETE Araraquara, totalizando cerca de 252 toneladas por ano. Esse resíduo é classificado como Classe II A e sua destinação final é o aterro sanitário da CGR em Guatapará, São Paulo. O Plano também apresenta o estudo de duas possibilidades para o lodo seco, sendo elas: a utilização como fertilizante para sólidos agricultáveis e o reaproveitamento na fornalha do secador, como combustível. O resumo da gestão dos resíduos de serviços públicos de saneamento básico é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo da gestão de resíduos de serviços públicos de saneamento básico de Araraquara

ELEMENTO		RESUMO	INFORMAÇÕES
LEGISLAÇÕES E PROGRAMAS			NÃO EXISTE LEGISLAÇÃO MUNICIPAL SOBRE GESTÃO DOS RESÍDUOS DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO BÁSICO
RESPONSÁVEL PELA GESTÃO E GERENCIAMENTO	E		GERADOR (DAAE)
ORIGEM			GERADOS NAS ETAs, ETE e ETR, EXCETUADOS OS REFERIDOS NA ALÍNEA "C" (RSU).
QUANTIDADE COLETADA			6 TONELADAS/DIA DE RESÍDUOS DO TRATAMENTO PRELIMINAR DA ETE; 10 m ³ /dia DE LODO SECO E 15 m ³ /dia DE CHORUME
ÍNDICE DE GERAÇÃO			----
TAXAS E FORMAS DE COBRANÇA			----
TIPO E ABRANGÊNCIA DA COLETA			COLETA POR EMPRESA TERCEIRIZADA PELO DAAE
SETORES DE COLETA E FREQUÊNCIA			----
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA			VER ITEM B - DIAGNÓSTICO
CLASSIFICAÇÃO			VER ITEM B - DIAGNÓSTICO
FORMAS DE DESTINAÇÃO AMBIENTALMENTE ADEQUADA			<ul style="list-style-type: none"> • LODO: SECAGEM TÉRMICA DE LODO • LODO SECO E DEMAIS RESÍDUOS GERADOS: ATERRO SANITÁRIO DA CGR (GUATAPARÁ-SP)
TIPO DE DISPOSIÇÃO FINAL AMBIENTALMENTE ADEQUADA			ATERRO SANITÁRIO DA CGR (GUATAPARÁ-SP)
ESTIMATIVA DE CUSTOS ENVOLVIDOS			R\$ 191,00 CADA CAÇAMBA DE 5m ³ DE LODO SECO DESTINADO AO ATERRO SANITÁRIO DA CGR
IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADOS			---
OBSERVAÇÕES			---

Fonte: Araraquara (2013)

De acordo com informações obtidas junto ao Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE), o sistema de dragagem, desaguamento e secagem térmica do lodo produzia resíduo com teor de umidade de 10%. Entretanto, esse sistema encontra-se inoperante desde 2016. Houve a remoção aproximada de 60.000 m³ de lodo por meio de dragagem das lagoas de sedimentação entre 2019 e 2020, sendo o material acondicionado em bags geotêxteis que ainda estão presentes na ETE. Estima-se que o volume desses bags seja de aproximadamente 15.000 m³, com o lodo apresentando um teor de umidade de 70%.

Pensando-se nos dados obtidos é possível considerar que, segundo a informação do DAAE de dragagem de 60.000 m³ de lodo equivalente a 3 anos de acúmulo (de 2016 a 2019), a geração anual é de 20.000 m³, indicando geração diária de aproximadamente 55 m³. Esse dado contrasta com a geração diária de 10 m³ apontada no PMGIRS, entretanto é mencionado que se trata do lodo após passagem pelo tratamento de secagem. Sendo assim, é possível concluir uma redução de 82 % no volume após a etapa de secagem, que no momento encontra-se inoperante. A eficiência da redução de umidade nos geotêxteis é em maior prazo que o sistema de desaguamento e secagem térmica, ilustrado pelo dado de redução de 75 % do resíduo original em um período de 3 anos de armazenagem, conforme dados do DAAE.

É bem vista a informação quantitativa de geração, especificamente para o lodo residual biológico, trazidas no Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos e, devido a influência das características de concentração de sólidos/umidade no volume do resíduo semissólido, pensa-se que não é possível concluir a divergência entre os dados trabalhados, mas sim variação em função das características dos resíduos quantificados.

5.2.1.2. São Carlos

Na ETE Monjolinho, ocorre a produção de lodo tanto no processo biológico quanto no processo físico-químico. Além disso, a Estação de Tratamento de Água (ETA) Vila Pureza envia os lodos gerados para a ETE Monjolinho, onde são submetidos a um processo de adensamento através de centrífugas e, posteriormente, destinados ao aterro CGR Guatapará (SÃO CARLOS, 2019). De acordo com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) para o ano de 2019, que representa o cenário mais recente dos planos municipais estudados, estima-se que aproximadamente 1.320 m³ de lodo são gerados na ETA Vila Pureza, com uma umidade de 93%, enquanto na ETE Monjolinho são geradas cerca de 4.145 toneladas.

Por sua vez, o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de 2012 relata que a ETE Monjolinho gera 30 toneladas diárias de lodo, que são destinadas a um aterro industrial privado em Paulínia-SP, e mais 15 toneladas diárias são destinadas ao aterro sanitário de São Carlos, dependendo da operação da ETE. O plano apresenta estimativas de geração de resíduos na ETE Monjolinho para os anos de 2015 (34,58 ton/dia), 2020 (36,72 ton/dia), 2025 (39 ton/dia) e 2030 (41,43 ton/dia).

O site do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) informa uma quantidade de 45 toneladas diárias de lodo, com um teor de sólidos de 23%. Essa mesma fonte menciona a filosofia de melhoria contínua da empresa, destacando a geração de energia a partir do biogás resultante da queima do lodo. No entanto, não são fornecidos detalhes específicos sobre essa operação.

Há uma grande discrepância entre as informações trazidas pelas fontes utilizadas, sendo o volume de geração trazido pelo PMSB e SAAE mais próximos (45 ton/dia), do que o dado do PMGIRS de 4.145 ton anuais, representando geração diária de apenas 11 ton, considerando operação em todos os dias do ano. Todavia, tanto as informações do PMSB quanto do PMGIRS, não apresentam o teor de sólidos do resíduo quantificado, podendo ser gerados impactos de

volume em função da maior ou menor umidade presente no resíduo. São divergentes também os apontamentos sobre a destinação final, apesar de ambos tratarem-se de aterros sanitários.

Pensa-se que as informações do SAAE e PMSB são mais plausíveis em termos de quantificação da geração, visando a vazão de atendimento da ETE, porém, tendo em vista o ano de elaboração do PMGIRS de São Carlos, considerou-se mais verídica a destinação final ao aterro CGR Guatapará, o mesmo para onde é enviado o lodo da ETE Araraquara e motivo pelo qual elaborou-se o subtópico seguinte.

5.2.1.3. CTR Guatapará

O aterro CGR Guatapará é licenciado para o recebimento de resíduos domiciliares e industriais Classe IIA e IIB, encontra-se em operação desde 2007, numa área de 980.000 m³, tendo vida útil estimada para 2026. Tem contribuição de resíduos domiciliares e industriais de 17 municípios, dentre eles, Araraquara, Ribeirão Preto, São Carlos e Descalvado (GUATAPARÁ, 2014).

O PMGIRS do município de Guatapará indica que o sistema empregado no aterro é de células em camadas, onde os resíduos são dispostos, compactados e cobertos com solo argiloso compactado. A impermeabilização de todo o local é complementada com geomembranas de PEAD de 2 mm. Possui um sistema de ventilação passiva por sistema ativo de coleta e queima de biogás, além de geradores que usam a queima do biogás para geração de eletricidade, que é utilizada, parte para consumo próprio e parte para exportação para rede. A Figura 24 ilustra o aterro CGR Guatapará.

Figura 24 – Aterro CGR Guatapará

a. Balança rodoviária na área do aterro sanitário



b. Compactação dos resíduos em camadas



c. Vista dos Geradores



Fonte: Guatapará (2014)

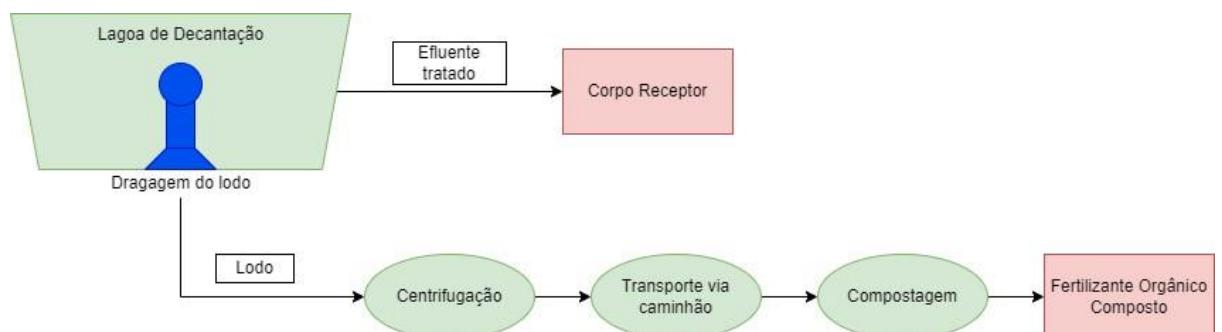
Segundo notícia do G1 (2014), esse aterro é a primeira usina no interior de São Paulo a realizar energia a partir do “lixo”, onde o centro de gerenciamento de resíduos teve investimento de 15 milhões de reais e tem capacidade para geração de 4,2 megawatts de energia, equivalente ao abastecimento de 18 mil pessoas. Importante ressaltar que o local realiza reaproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, porém têm o recebimento de outros diversos resíduos sólidos além dos resíduos de serviços públicos de saneamento básico, mais especificamente, o lodo residual biológico, todavia compensatório destacar os potenciais de reaproveitamento energético/poder calorífico do biossólido de foco no trabalho.

5.2.2. UGRHI 5

5.2.2.1. Jundiaí

Em relação ao sistema de desidratação do lodo da ETEJ, a CSJ (2023) apresenta que se realiza a dragagem do lodo depositado no fundo das lagoas de decantação e que o lodo passa por centrifugação enquanto processo de desaguamento. A etapa final do processo de tratamento de lodo consiste em compostagem termofílica do resíduo sólido, misturando-o a outros materiais orgânicos e produzindo um fertilizante orgânico. Um fluxograma simplificado do sistema é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do sistema de desidratação do lodo da ETE Jundiaí



Fonte: Adaptado de CSJ (2023)

O PMGIRS de Jundiaí, divulgado em 2018, não trata sobre os resíduos de serviços de saneamento básico e, especificamente, de lodo de esgotos, não sendo possível levantar os dados quantitativos da geração de lodo municipal (JUNDIAÍ, 2018). O PMSB indica que a desidratação do lodo é realizada na ETE Jundiaí, que recebe o lodo gerado nas outras duas ETEs e na ETA do município, porém sem maior detalhamento sobre o processo e o volume de lodo

(JUNDIAÍ, 2017). Por fim, a CSJ (2023) informa o dado quantitativo de 4.500 ton/mês de lodo dragado na ETE Jundiaí, sem apresentar demais informações sobre o volume total de lodo desidratado enviado para compostagem.

Sobre o processo de compostagem adotado, a CSJ (2023) mostra que essa escolha foi determinada devido ao grande potencial de uso na agricultura do lodo de esgoto, sendo uma grande fonte de matéria orgânica. O sistema de compostagem termofílica representa um processo em que o lodo desidratado é misturado com matéria orgânica seca, como podas urbanas, bagaço de cana-de-açúcar, cascas de eucalipto e outros, que são submetidos à atividade microbiana de consumo de matéria orgânica. O processo ocorre em temperaturas acima de 55°C, eliminando organismos patogênicos e produzindo fertilizante orgânico composto, como é chamado. A Figura 26 identifica o local em que o processo é realizado.

Figura 26 – Galpão de compostagem



Fonte: CSJ (2023)

Apresenta-se também que não apenas o lodo gerado a partir de esgoto doméstico, mas o lodo gerado a partir da atividade industrial é transformado em fertilizante. Dito isso, é realizado o controle dos teores de metais pesados no lodo, além deste passar por um processo de aditivação para diminuir as perdas de amônia, visando evitar mau odor e enriquecer o material com micronutrientes. Após o tratamento, o material tem denominação de fertilizante orgânico composto classe B, registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como um produto seguro a ser utilizado na agricultura. O fertilizante

é então fornecido para paisagistas, floricultores e produtores, podendo ser utilizado por culturas de soja, cana-de-açúcar, café, entre outros (CSJ, 2023).

É importante ressaltar que não é contabilizado e divulgado pelo PMSB, PMGIRS ou pela CSJ qual a quantificação de lodo enviado para o processo de compostagem, e qual o volume de fertilizante produzido. Conforme divulgado pela prefeitura de Jundiaí, a compostagem termofílica é realizada por outra empresa privada, dessa forma, não foi possível acessar os dados de monitoramento da geração e destinação do fertilizante. Ademais, conclui-se que todo o lodo gerado a partir de esgoto doméstico e atividade industrial no município de Jundiaí está sendo enviado para uma alternativa de destinação final que é ambientalmente mais adequada, visando a diminuição do aumento do volume dos aterros sanitários.

5.2.2.2. Piracicaba

De acordo com o PMGIRS, a quantidade média de geração de lodo em todas as ETEs do município é de 43 ton/dia. O transporte do lodo é realizado diariamente por caminhões com sistema de carga tipo Roll-On e capacidade de 15 m³, monitorados pela empresa responsável, até a Essencial Central de Tratamento de Resíduos Ltda., que está localizada em Rio das Pedras, onde é realizado o tratamento de lodo e cita-se que a regulamentação deste serviço apresenta como validade a data de 29/07/2021 (PIRACICABA, 2019).

De acordo com informações da Águas de Mirante, o processo de desidratação do lodo consiste no envio para um leito de secagem após a retirada do lodo dos decantadores. É apresentado que o processo de entrada do lodo no secador é feito em batelada e ocorre uma redução do volume de, em média, 76%. Com isso, existe também uma redução de custos com o transporte e da quilometragem percorrida, uma vez que é necessário um número menor de viagens para a destinação final do lodo seco.

Também é informado que a ETE Bela Vista tem recebido o lodo gerado nas outras 3 maiores ETEs do município, cerca de 1.200 ton/mês. De acordo com o *site* da Águas de Mirante, as maiores ETEs além da selecionada são as denominadas Piracicamirim, com vazão de 357 L/s, Ponte do Caixão, com vazão de 413 L/s e Capim Fino, com vazão de 80 L/s. Como os processos de cada estação não são apresentados, considera-se que o leito de secagem realiza o tratamento de diferentes tipos de lodo, como primário e terciário, além do biológico. Em relação à destinação final do lodo seco, atualmente está sendo disposto em um aterro sanitário de Paulínia devido à falta de licenciamento ambiental, conforme informações da Águas de Mirante.

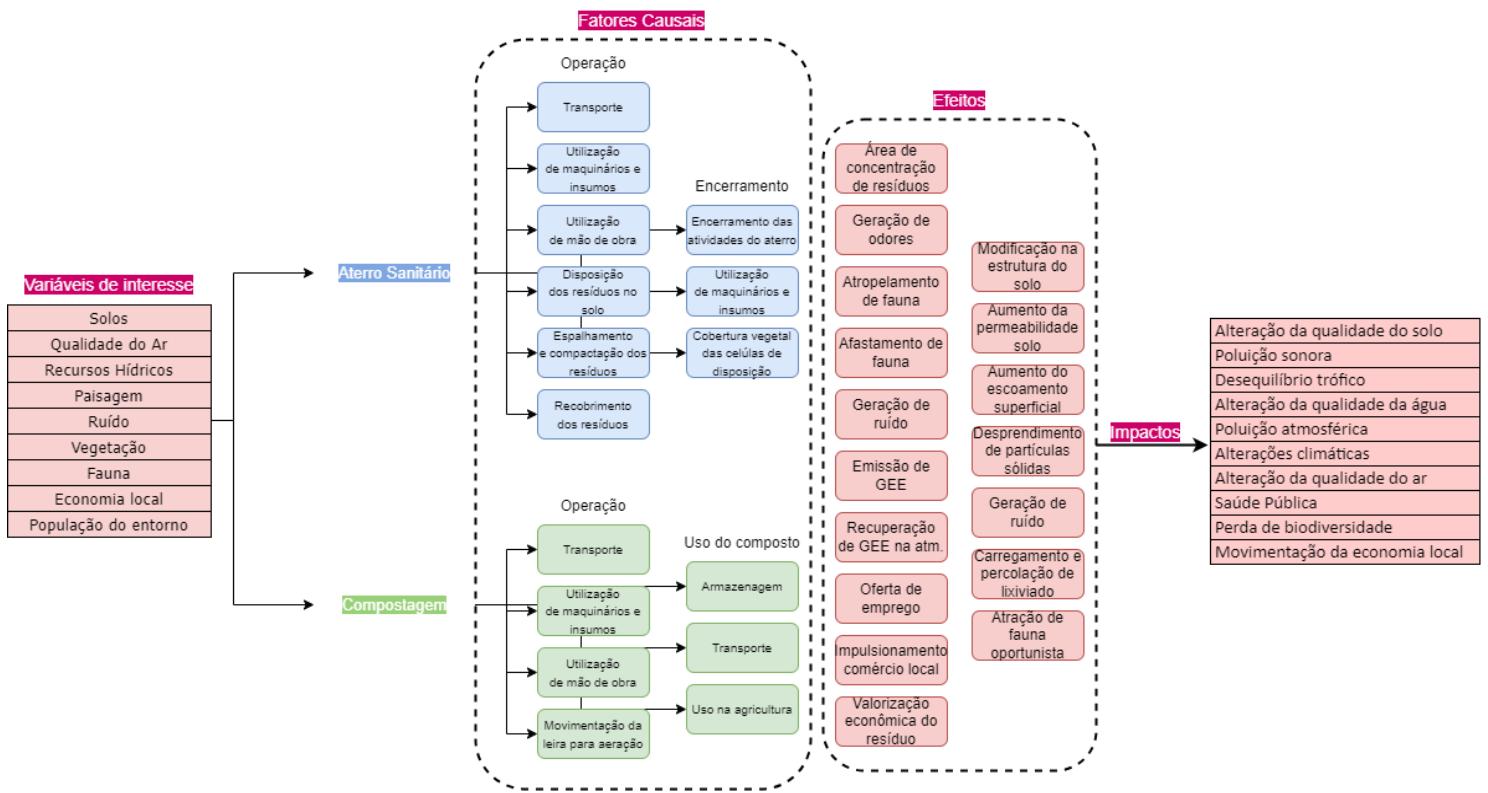
Realizando uma comparação entre o dado de geração de lodo fornecido pelo PMGIRS, de 43 ton/dia ou cerca de 1.290 ton/mês, e o dado de geração fornecido pela empresa responsável de 1.200 ton/mês, é possível apontar a convergência entre estes. Não é de conhecimento público a data em que o leito de secagem foi implantado na estação, porém assume-se que este ocorreu após a publicação da revisão do PMGIRS em 2019, uma vez que o plano afirma que a desidratação do lodo ocorre em outro município e que a data final deste serviço seria no ano de 2021.

Por fim, segundo a empresa responsável pela operação da ETE, existe um projeto para implantação de um sistema de compostagem para o lodo seco. Como apresentado no item anterior, para a ETE Jundiaí, o processo une o lodo a outros tipos de matéria orgânica e visa produzir um fertilizante, que pode ser utilizado na agricultura. Para esse uso, no entanto, algumas normas e legislações são estabelecidas previamente e precisam ser cumpridas. Avalia-se que a adoção dessa alternativa de destinação final é ambientalmente adequada e está alinhada à tendência de soluções não convencionais e mais econômicas que se iniciará com a implantação dos leitos de secagem *in loco*.

5.3. Avaliação de impacto da destinação final do lodo

A partir de rede de causa-efeito (rede de Sorensen) elaborou-se uma matriz de avaliação de impactos socioambientais das operações das duas destinações finais adotadas pelos 4 municípios de enfoque deste trabalho: disposição final em aterro sanitário e compostagem para uso agrícola. As atividades de manejo do resíduo, assim como o seu processo de degradação, ocasionam na geração de gases, efluentes, movimentações de solo e paisagem que podem influir em impactos diversos, como alteração da qualidade do solo, da água, do ar, influência nos processos ecossistêmicos existentes e saúde pública da população no entorno. A Figura 27 apresenta uma síntese em fluxograma das variáveis de interesse, fatores causais por atividade, efeitos e impactos ocasionados, enquanto o Apêndice A traz na íntegra a rede elaborada.

Figura 27 – Fluxograma simplificado da rede causa-efeito



Fonte: Autores (2023)

Os fatores causais considerados na elaboração da rede foram elencados as etapas de operação de um aterro sanitário, como transporte, uso de maquinários, insumos e mão de obra, além da disposição, compactação e recobrimento dos resíduos. Considerou-se também a fase de encerramento do aterro, levantando o próprio encerramento das atividades, uso de maquinários e insumos e a cobertura vegetal das células de disposição. Para a compostagem, também foram elencadas as etapas de operação, diferenciando-se do aterro pela movimentação das leiras para aeração em oposição à compactação dos resíduos, e a etapa de uso do composto, considerando armazenamento, transporte e uso na agricultura. Apresenta-se a relação entre as variáveis de interesse e os fatores causais definidos na Figura 28.

Figura 28 – Variáveis de interesse e fatores causais da rede causa-efeito

VARIÁVEIS DE INTERESSE																	
Solos			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Qualidade do Ar	x		x	x		x	x	x	x	x		x			x		
Recursos Hídricos			x	x										x			
Paísagem			x	x	x	x		x		x			x				
Ruído	x	x	x					x		x		x	x		x		
Vegetação								x							x	x	
Fauna	x		x	x				x		x	x		x		x		
Economia local		x	x					x	x			x	x			x	
População do entorno	x		x	x				x	x		x		x		x		
DESTINAÇÃO FINAL																	
Aterro Sanitário																	
Fase de operação								Fase de encerramento								Compostagem	
Transporte	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Disposição dos resíduos no solo	Espalhamento e compactação dos resíduos	Recobrimento das resíduos	Encerramento das atividades do aterro	Utilização de maquinários e insumos	Cobertura vegetal das células de disposição	Transporte	Disposição dos resíduos no solo e mistura de matéria seca	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Movimentação da leira para promoção de aeriação	Armazenagem	Transporte	Uso na agricultura	

Fonte: Autores (2023)

Assim, a partir das condições iniciais abordadas como possíveis causas, apresentadas na Figura 29, analisou-se quais etapas dos processos de destinação final ocasionaram um possível efeito. Importante destacar que as alterações de qualidade podem ser relativizadas a depender de qual operação efetuada, por exemplo, a cobertura vegetal efetuada no encerramento de atividade de um aterro sanitário pode alterar a qualidade da água devido ao aumento da infiltração no solo, protegendo assoreamentos, sendo, portanto, um impacto positivo, enquanto a cobertura das camadas durante vida útil do aterro ocasionam nessa alteração de qualidade, porém de forma adversa, já que ocasiona no aumento do escoamento superficial devido redução de permeabilidade.

Figura 29 – Fatores causais e condições iniciais da rede causa-efeito

DESTINAÇÃO FINAL																	
Aterro Sanitário																	
Fase de operação								Fase de encerramento								Compostagem	
Transporte	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Disposição dos resíduos no solo	Espalhamento e compactação dos resíduos	Recobrimento das resíduos	Encerramento das atividades do aterro	Utilização de maquinários e insumos	Cobertura vegetal das células de disposição	Transporte	Disposição dos resíduos no solo e mistura de matéria seca	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Movimentação da leira para promoção de aeriação	Armazenagem	Transporte	Uso na agricultura	
	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	CONDICÃO INICIAL	
	x	x		x	x		x	x		x	x	x	x			Movimentação do solo	
			x	x	x			x			x		x			Compactação do solo	
			x	x	x			x			x		x			Drenagem de águas pluviais	
			x	x									x			Geração de efluente	
x	x	x		x	x	x	x	x		x		x		x		Emissão de gases	
		x	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x		Modificação da paisagem	
x									x				x		x	Transporte terrestre	
	x	x					x			x	x				x	Alterações na dinâmica econômica	

Fonte: Autores (2023)

A maior parte dos processos levantados influí diretamente na movimentação e compactação do solo, por abordarem diretamente a chegada, disposição e movimentação dos

resíduos e a cobertura ou retirada destes do solo. Com isso, entende-se que os principais impactos são as alterações da qualidade do solo, tendo em vista a modificação da estrutura do solo pelo aumento da permeabilidade, em caso de impacto positivo pela cobertura vegetal, ou pela diminuição da permeabilidade e aumento do escoamento superficial gerado pela compactação. Indica-se, também, a poluição sonora e o desequilíbrio trófico causados pelo uso de maquinários, que gera ruídos e o afastamento de fauna. É possível relacionar os impactos no solo diretamente com a drenagem de águas pluviais, que depende da estrutura do solo e pode ter alterações de qualidade da água a partir dos mesmos efeitos citados.

Com a decomposição dos resíduos, especificamente, o lodo como resíduo orgânico, existe a geração de um efluente muito concentrado como consequência. Dessa forma, considera-se que o carregamento ou arraste desse lixiviado em corpos hídricos ocasiona alteração da qualidade da água devido à sua alta carga orgânica; adiciona-se, ainda, que mesmo com o efluente gerado pela compostagem seja considerado como um biofertilizante, sua concentração de nutrientes é muito alta e a liberação diretamente nos recursos hídricos causa impacto negativo. Além disso, a percolação do lixiviado ocasiona alteração na qualidade do solo, seguindo a mesma premissa apresentada para a água.

Os processos de destinação final abordados também têm grande participação na geração de gases para a atmosfera, por meio do transporte de resíduos, pelo uso de maquinários e pela própria decomposição destes. Com isso, os impactos negativos levantados são a poluição atmosférica e as alterações climáticas, resultantes da liberação de gases de efeito estufa. Entende-se, por outro lado, que etapas de cobertura vegetal como a considerada na fase de encerramento do aterro sanitário, podem auxiliar na recuperação de gases poluentes da atmosfera por meio da vegetação, ocasionando uma alteração positiva da qualidade do ar.

Ainda relacionado à emissão de gases de efeito estufa, levanta-se os impactos relacionados em relação ao transporte terrestre, que é essencialmente realizado para o funcionamento de aterros sanitários e processos de compostagem. Neste caso, cita-se a alteração de qualidade do ar e do clima devido à queima de combustíveis fósseis. Ademais, relaciona-se ao transporte à poluição sonora pela geração de ruído, ao desequilíbrio trófico pelo afastamento da fauna e à perda de biodiversidade pelo risco de atropelamento da fauna.

A modificação da paisagem causada pela instalação e funcionamento dos aterros e grandes pátios de compostagem também é de extrema importância. Neste caso, além dos impactos causados por ruído e efeitos sobre a fauna, citados anteriormente, considera-se a geração de odores desagradáveis, que causa alteração da qualidade do ar e influí diretamente

na população do entorno. Pensando na população, também é considerado que o fato de ser uma área de concentração de resíduos tem grande relevância na questão da saúde pública, uma vez que a falta de controle e monitoramento, principalmente pensando nos aterros sanitários, pode ter grande impacto negativo na vida das pessoas ali situadas.

Por fim, indica-se como um impacto positivo dos empreendimentos a movimentação da economia local, por meio do aumento da oferta de empregos, impulsionamento do comércio e dos serviços locais, considerando a compra interna de insumos e contratações externas, e pela valorização econômica do reaproveitamento do resíduo, considerando seu uso na agricultura e a possibilidade de geração de renda a partir deste. Os impactos levantados na rede de Sorense estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 – Condições iniciais, efeitos e impactos da rede causa-efeito

CONDICÃO INICIAL	EFEITOS	IMPACTOS
Movimentação do solo	Modificação na estrutura do solo	Alteração da qualidade do solo
	Geração de ruído	Polução sonora
	Afastamento de fauna	Desequilíbrio trófico
Compactação do solo	Aumento da permeabilidade do solo e proteção contra processos erosivos	Alteração da qualidade do solo
	Aumento do escoamento superficial e de processos erosivos	Alteração da qualidade do solo
	Geração de ruído	Polução sonora
Drenagem de águas pluviais	Afastamento de fauna	Desequilíbrio trófico
	Aumento da infiltração e proteção contra processos de assoreamento	Alteração da qualidade da água
	Aumento do escoamento superficial e de processos de assoreamento	Alteração da qualidade da água
Geração de efluente	Desprendimento de partículas sólidas	
	Carregamento de lixíviodo de alta carga orgânica	Alteração da qualidade da água
Emissão de gases	Percolação do lixíviodo de alta carga orgânica	Alteração da qualidade do solo
	Aumento da concentração de GEE na atmosfera	Polução atmosférica
Modificação da paisagem	Recuperação de gases de GEE na atmosfera com vegetação	Alterações climáticas
	Geração de ruído	Alteração da qualidade do ar
	Atração de fauna oportunista	Polução sonora
	Área de concentração de resíduos	Desequilíbrio trófico
Transporte terrestre	Geração de odores	Saúde Pública
	Geração de ruído	Alteração da qualidade do ar
	Afastamento de fauna	Polução sonora
	Atropelamento de fauna	Desequilíbrio trófico
Alterações na dinâmica econômica	Aumento da concentração de GEE na atmosfera devido a queima de combustível	Perda de biodiversidade
	Oferta de emprego	Alteração da qualidade do ar
	Impulsionamento do comércio local	Alterações climáticas
	Valorização econômica do reaproveitamento do resíduo	Movimentação da economia local

Fonte: Autores (2023)

6. CONCLUSÃO

Com base na revisão bibliográfica realizada, foi observado que os sistemas aeróbios geralmente apresentam uma maior geração de lodo em comparação aos processos anaeróbios. Como exemplo, em sistemas de lodos ativados com aeração prolongada, a faixa de produção de lodo varia de 3,3 a 5,6 L/hab.dia, enquanto em reatores UASB essa faixa é de 0,6 a 2,2 L/hab.dia. No caso da ETE do município de Araraquara, que opera um sistema composto por lagoa de aeração seguida de lagoa de sedimentação, os dados do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de 2014 indicam uma vazão de lodo de 70 m³/h, com teor de umidade de 99,5%. Após o tratamento, que envolve o uso de decanter centrífugo seguido de secador térmico, o teor de umidade é reduzido para 20%.

No entanto, informações externas do DAEE indicam que o sistema não está atualmente em operação, resultando no armazenamento do resíduo em bags geotêxtil. Essas informações também relatam a geração diária de 55 m³ de lodo na ETE, enquanto o PMGIRS de 2013 menciona um volume de 10 m³/dia de lodo seco. Esses dados apresentam uma grande discrepância, especialmente considerando que o PMSB trabalha com unidades em horas, levando a crer que a diferença possa estar relacionada ao teor de sólidos do resíduo, que não é especificado em todas as fontes. No que diz respeito ao tratamento do lodo, conclui-se que a inatividade do tratamento por secador térmico resulta em menor eficiência na redução do volume. Isso é evidenciado pelo fato de que o sistema de bags geotêxtil reduziu aproximadamente 75% da umidade do resíduo após um período de armazenamento de 3 anos.

A ETE do município de São Carlos, por sua vez, adota um tratamento biológico utilizando um Reator UASB, onde são geradas 11 toneladas por dia e 4.145 toneladas por ano de lodo, de acordo com o PMGIRS de 2019. Já o PMSB de 2012 indica uma geração diária de aproximadamente 45 toneladas, ou seja, 16.420 toneladas por ano. O Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) também menciona a geração diária de 45 toneladas com 77% de umidade. Somente o SAAE fornece o percentual de umidade do lodo gerado, dificultando a comparação com as outras fontes de informação. Embora o dado do PMGIRS seja o mais atualizado, observa-se uma maior discrepância em relação às outras fontes. De acordo com a teoria, ao comparar os dois municípios da UGRHI 13, espera-se que a geração de lodo no município de São Carlos seja menor em relação a Araraquara, uma vez que as ETEs apresentam faixas de vazão com valores próximos, e o tratamento anaeróbio gera um volume de lodo menor em comparação ao tratamento aeróbio.

No caso da ETE do município de Jundiaí, que utiliza um sistema de lagoas aeradas seguidas de lagoa de decantação, a empresa responsável pela operação informa uma geração de 4.500 toneladas por mês, ou seja, 54.000 toneladas de lodo por ano. Os planos municipais não fornecem dados sobre a geração do lodo, impossibilitando a comparação com as informações disponíveis. Para a ETE do município de Piracicaba, que é composta por tanques de aeração seguidos de decantadores secundários, o PMGIRS de 2019 indica uma geração de 1.290 toneladas por mês, ou seja, 15.480 toneladas por ano, enquanto a empresa responsável menciona uma geração de 1.200 toneladas por mês, resultando em 14.400 toneladas por ano. Neste caso, encarou-se os dados apresentados pelo município são convergentes.

Ao observar a UGRHI 5, percebe-se que, embora as ETEs selecionadas apresentem sistemas de tratamento de esgoto similares, as vazões de tratamento são muito divergentes. A ETE de Jundiaí possui uma vazão de 1.530 L/s, enquanto a ETE de Piracicaba possui uma vazão de 436 L/s, o que explica a grande diferença nos valores de geração de lodo. No entanto, ao estabelecer uma relação proporcional com base nas vazões de tratamento, os dados de geração do lodo residual apresentam uma coerência significativa.

Os planos municipais, especialmente os Planos Municipais de Saneamento Básico e os Planos Municipais de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, foram documentos de grande importância para este trabalho. Esses planos, datados de diferentes anos, como 2010, 2012, 2014, 2017 e 2018, para os municípios de Piracicaba, São Carlos, Araraquara e Jundiaí, respectivamente, foram fundamentais para obter informações operacionais, projetos e dados quantitativos. No entanto, é importante ressaltar que as datas de atualização dos planos podem afetar a qualidade dos dados considerados. Embora existam projeções de cenários futuros, ao longo dos anos podem ocorrer modificações significativas, incluindo o crescimento populacional, que pode diferir das previsões iniciais. Os PMGIRS de Piracicaba e São Carlos, ambos com 4 anos de idade, são os documentos mais recentes.

Em relação a Araraquara, os planos municipais forneceram informações detalhadas sobre operações, projetos e dados quantitativos, embora tenham apresentado algumas divergências. Piracicaba e São Carlos também abordaram a maioria dessas considerações, porém de forma mais superficial. São Carlos assemelha-se a Araraquara nas divergências de dados quantitativos, enquanto Piracicaba se destaca pelo alinhamento entre as informações. Já no caso de Jundiaí, não foram abordadas questões quantitativas relacionadas aos resíduos de serviços de saneamento básico, em particular, ao lodo residual biológico. Além dos planos municipais, as empresas de saneamento responsáveis pelo tratamento de esgoto, especialmente

por meio de suas páginas online, foram fontes de dados importantes, incluindo informações externas, como nos casos de Araraquara e Piracicaba.

Quanto à destinação final dos resíduos de serviços públicos de saneamento básico das ETEs, os dados do SINIR evidenciam que a maior porcentagem gerada no estado de São Paulo é encaminhada para disposição em aterros sanitários. Em relação ao lodo de esgoto, o estudo de caso corrobora com essa informação, já que três dos quatro municípios abordados destinam o resíduo para aterros. No entanto, Piracicaba apresenta projeto em andamento para substituir a disposição em aterros por compostagem, com posterior uso na agricultura, conforme já realizado por Jundiaí. Na Tabela 13 apresenta-se em síntese os resultados obtidos. A matriz de Sorenson destaca os impactos dessas duas alternativas, demonstrando maiores benefícios ambientais na destinação para a compostagem, como o manejo do solo (maior permeabilidade) e a valorização econômica do produto gerado, além de evitar contribuição para a saturação da vida útil dos aterros sanitários.

Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos

Município	Vazão média (L/s)	Produção de lodo (ton/mês)	Tipo de tratamento	Processo de desidratação	Destinação final
São Carlos	600	345	Anaeróbio (Reator UASB)	Centrífuga	Aterro Sanitário
Araraquara	700	1700		Bigbag	
Piracicaba	436	1200		Não informado	
Jundiaí	1100	4500		Centrífuga	Compostagem

Fonte: Autoria Própria (2023)

A abordagem de redução no volume de lodo e destinações finais ambientalmente adequadas, visando, inclusive, seu reaproveitamento, estão alinhadas com os objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Dessa forma, é importante realizar estudos de viabilidade para a aplicação do lodo residual, levando também em consideração a urgência global em relação a questões ambientais, dentre elas, o gerenciamento de resíduos sólidos e o saneamento básico, além disso, é visto como os volumes de geração desses resíduos são significativos e os desafios enfrentados para o seu tratamento. Avaliar a viabilidade para destinações finais mais nobres ao lodo de esgoto, como a incorporação do resíduo na matéria-prima para a produção de cerâmicas e, levando em conta seu poder calorífico, o reaproveitamento energético, são sugestões para estudos futuros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREN - Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. **Brasil pode ter 2,3 GW e solução de saneamento com usinas WTE**. Canal Energia. Rio de Janeiro. maio. 2021. Disponível em: <<https://abren.org.br/2021/05/13/brasil-pode-ter-23-gw-e-solucao-de-saneamento-com-usinas-wte-canalenergia/>>. Acesso em: 03 jun. 2023.

ÁGUAS DE MIRANTE. **Esgotamento Sanitário**. Disponível em: <<https://www.miranteppp.com.br/esgotamento-sanitario/>>. Acesso em: 28 março 2023.

ANDRADE NETO, C. O. **Filtro anaeróbio aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 2004. 195 f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

ANDREOLI, C. V. *et al.* **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Curitiba: ABES, 2001. (PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico).

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.

ARARAQUARA. Lei Municipal nº 8.868, de 06 de janeiro de 2017. Institui a **Estrutura Administrativa do Departamento Autônomo de Água e Esgotos de Araraquara - DAAE**. Araraquara, SP.

ARARAQUARA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Prefeitura Municipal de Araraquara. WALM: Engenharia e Tecnologia Ambiental. 387 p. 2014.

ARARAQUARA. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. Prefeitura do Município de Araraquara. Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE). 371 p. 2013.

AREIAS, I. O. R. *et al.* **Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha**. Cerâmica, [S.L.], v. 63, n. 367, p. 343-349, set. 2017. UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672004>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.849: Resíduos Sólidos Urbanos - Aterros Sanitários de Pequeno Porte - Diretrizes para Localização, Projeto, Implantação, Operação e Encerramento. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BORGES, N. B. Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto. 2014. 234 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Institui a **Constituição Federal.** Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. Institui o **Marco Legal do Saneamento Básico.** Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a **Política Nacional dos Resíduos Sólidos.** Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o **Marco Legal do Saneamento Básico.** Brasília, DF.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Institui a **Política Nacional do Meio Ambiente.** Brasília, DF.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.** Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 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.** Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos.** Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 397, de 03 de abril de 2008. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.** Conselho Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos.** Disponível em: <<https://sinir.gov.br/>>. Acesso em: 31 maio 2023.

BRASIL. SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Painel de Informações sobre Saneamento.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snис>>. Acesso em: 31 maio 2023.

CABALLERO, C. B. Análise do Processo de Avaliação de Impactos Ambientais do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte — PA. 2016. 112 f. TCC (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) — Faculdade de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

CABEDO JUNIOR, F. C. S. et al. Saneamento: interferência na saúde pública e no desenvolvimento socioeconômico. Revista da FAESF, Floriano, v. 2, n. 3, p. 2-8, 23 out. 2018. FAESF - Faculdade de Ensino Superior de Floriano. <http://dx.doi.org/10.58969/25947125.2.3.2018.54>

CAMPOS, J. R. et al. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999. (PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico).

CASTAGNATO, R. Tratabilidade de esgoto sanitário contendo formaldeído em um sistema combinado filtro anaeróbio – biofiltro aerado submerso. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado).

CHERNICHARO, C. A. L. *et al.* Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE**, São Paulo, v. 66, n. 214, p. 5-16, nov. 2018.

CSJ - COMPANHIA SANEAMENTO DE JUNDIAÍ. Estação de Tratamento de Esgoto de Jundiaí. Disponível em: <<https://saneamento.com.br/etej/>>. Acesso em: 28 março 2023.

DAE - Departamento Autônomo de Água e Esgoto. Araraquara. **Tratamento de Água e Esgoto.** Disponível em: <<https://daaeeararaquara.com.br/tratamento-de-agua-e-esgoto/>>. Acesso em: 15 junho 2023.

DAE JUNDIAÍ. Esgoto. Disponível em: <<https://daejundiai.com.br/esgoto/>>. Acesso em: 28 março 2023.

DOMINGUEZ, D. X. **Avaliação dos riscos ambientais associados à utilização agrícola de lodo de esgoto como condicionador e fertilizante de solo.** 2014. 116 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

ENFIL. Catálogo de incineradores. Energia a partir do lixo: Fazemos do mundo um lugar mais limpo. 2013. Disponível em:<http://www.enfil.com.br/content_download/FOLDER_Energy_from_Waste_PT.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2023.

FERREIRA, R. G. A. Tratamento de lodo de esgoto com conjunto com resíduos de poda e capina através da biossecagem visando a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR). 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

FIOCRUZ-FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. FNS - Fundação Nacional de Saúde. Ministério da Saúde. Departamento de Saneamento (Distrito Federal). **Manual de Saneamento.** Brasília: Maria Liliane M. Montefusco dos Santos - COEDE/ASPLAN/FNS, 2018. 362 p. Disponível em: <http://www.fiocruz.br/biossegurança/>. Acesso em: 30 maio 2023.

FREITAS, E. C. B. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Esgoto Utilizando Análise Multicritério. 2020. 202 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

G1 Ribeirão e Franca. EPTV Notícias. **Entra em operação 1ª usina do interior de SP a gerar energia a partir do lixo.** Atualizado em 14/08/2014. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2014/08/entra-em-operacao-1-usina-do-interior-de-sp-gerar-energia-partir-do-lixo.htmls>>. Acesso em: 05 junho 2023.

GARRIDO-BASERBA, M. *et al.* **Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams.** Journal of environmental management, v. 112, p. 384-391, 2012.

GEWEHR, A. G. **Ecoeficiência de estações de tratamento de esgoto: índice de lodo.** 2009. 72 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GONÇALVES, R. F. *et al.* **Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas.** Vitória: UFES, 1999. (PROSAB - Programa de Pesquisas em Saneamento Básico).

GUATAPARÁ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.** Município de Guatapará. 158 p. 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal Cidades@.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 28 maio 2023.

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

JUNDIAÍ. Lei Municipal nº 5.307/99, de 05 de outubro de 1999. **Autoriza a criação da DAE S/A – Água e Esgoto.** Jundiaí, SP.

JUNDIAÍ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.** Jundiaí: Prefeitura Municipal de Jundiaí. Unidade de Gestão de Infraestrutura e Serviços Públicos. 237 p. 2018.

JUNDIAÍ. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Jundiaí: Prefeitura Municipal de Jundiaí. 298 p. 2017.

LEITE, T. A. **Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de biossólido para uso agrícola.** 2015. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes.** 2015. 122 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

MENDONÇA, N. F. **Avaliação dos impactos ambientais associados à inserção do sistema de biodigestão anaeróbia ao processamento da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar.** 2023. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** Tradução de Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5. ed., Nova Iorque: McGraw-Hill; Porto Alegre: AMGH. 2016.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Diferença entre lixão e aterro sanitário:** saiba a diferença dos dois principais destinos do lixo brasileiro. um é inapropriado e proibido. outro, criados especificamente para isso. Fórum Brasil de Gestão Ambiental, Brasília. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/mmanoforum>. Acesso em: 30 maio 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 31 maio 2023.

NASCIMENTO, M. C. P. **Filtro biológico percolador de pequena altura de meio suporte aplicado ao pós-tratamento de efluente de reator UASB.** 2001. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

OLIVEIRA, D. V. M. *et al.* Avaliação comparativa entre custos dos processos MBBR/IFAS e lodo ativado para o tratamento de esgoto sanitário. **Revista DAE**, São Paulo, v. 193, n. 193, p. 46-55, 1 set. 2013.

OLIVEIRA, S. V. W. B. **Modelo para tomada de decisão na escolha de tratamento de sistema de esgoto sanitário.** 2004. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PEDROZA, M. M. *et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão.* Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-188, dez. 2010.

PERDICÓULIS, A; GLASSON, J. **Causal networks in EIA.** Environmental Impact Assessment Review, [S.L.], v. 26, n. 6, p. 553-569, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2006.04.004>.

PIRACICABA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Piracicaba - SP.** Revisão 2019 - Volume 1. Piracicaba: Prefeitura Municipal de Piracicaba. 224 p. 2019.

PIRACICABA. **Plano Municipal de Saneamento Básico.** Sistema de Esgotos Sanitários. Piracicaba: Prefeitura Municipal de Piracicaba. Serviço Municipal de Água e Esgoto de Piracicaba. 2010.

PRADO, G. S. **Concepção e estudo de uma unidade compacta para tratamento preliminar de esgoto sanitário composta por separador hidrodinâmico por vórtice e grade fina de fluxo tangencial.** 240 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

REIS, R. F. **Sistema de remoção de água de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto com duas fases: desaguamento inicial em leito de drenagem seguido de biossecagem.** 2017. 255 f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

RIGOLIN, F. R. **Estudo de viabilidade técnica para incorporação de resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto em peças de concreto para pavimentação.** 2022. 50 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto. São Carlos. **E.T.E.S - Estações de Tratamento de Esgoto.** Disponível em: <<https://www.saaesaocarlos.com.br/saaesc/index.php/esgoto/e-t-e-s>>. Acesso em: 15 junho 2023.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 495 p.

SÃO CARLOS. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI). 483 p. 2019.

SÃO CARLOS. Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSSanca. Prefeitura Municipal de São Carlos. Coordenadoria de Meio Ambiente. 421 p. 2012.

SÃO CARLOS. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. **Aterro sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP.** Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial (FIPAI). 92 p. 2009.

SÃO PAULO. Comitê PCJ. **Relatório da Situação dos Recursos Hídricos 2017: UGRHI 05 - Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.** 79 p. Relatório Técnico. 2017 ¹.

SÃO PAULO. Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO). Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré (CBH-TJ). **Plano da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré.** Relatório II. 314 p. 2017 ².

SÃO PAULO. Lei Estadual nº 15.337, de 14 de dezembro de 2016. Institui o **Plano Estadual de Recursos Hídricos.** São Paulo, SP.

SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. TOMO I: Caracterização e Situação dos Recursos Hídricos. **Subsídios Técnicos para o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020-2023.** vol. 1. Diagnóstico Síntese. 257 p. Relatório Técnico. 2020.

SCHALCH, V; CASTRO, M. A. S.; CÓRDOBA, R. E. **Tratamento e Disposição Final Ambientalmente Adequada de Resíduos Sólidos Urbanos.** São Carlos: Neper, 2015. 53 p.

SILVA, A. G. L. et al. **Soluções Urbanas Sustentáveis: Avaliação Integrada do Abastecimento de Água e Tratamento de Esgoto a Partir de Gradientes de Densidade.** Mix Sustentável, Florianópolis, v. 6, n. 2, p. 67-78, mai. 2020.

SOUZA, T. P. **Tratamento do lodo de esgoto por compostagem: uso agrícola do composto e a redução da emissão de gases de efeito estufa.** 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SUNDEFELD JUNIOR, G. C. **Efeitos do recebimento do lodo da estação de tratamento de água pelo sistema de tratamento de esgoto por lodo ativado em bateladas e aeração prolongada do município de Juquitiba - SP.** 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2022.** Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/>>. Acesso em: 31 maio 2023.

URBAN, R. C; ISAAC, R. L; MORITA, D. M. **Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte.** Revista Dae, [S.L.], v. 67, n. 219, p. 128-158, out. 2019. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2019.050>.

VANZETTO, A. S. **Análise das alternativas tecnológicas de desaguamento de lodos produzidos em estações de tratamento de esgoto.** 2012. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM 139/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização: princípios do tratamento biológico de águas resíduárias.** 2a Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 196 p., 2002.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados: princípios do tratamento biológico de águas resíduárias.** 2a Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 416 p., 1997.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas resíduárias volume I: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Segrac, 238 p., 1996.

VARIÁVEIS DE INTERESSE																		
Solos																		
Qualidade do Ar	x		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Recursos Hídricos			x	x			x	x	x	x				x				
Paisagem			x	x	x	x		x	x			x						
Ruido	x	x	x				x	x	x	x	x		x					
Vegetação							x						x					
Fauna	x		x	x			x	x	x	x	x		x					
Economia local		x	x			x	x			x	x			x				
População do entorno	x		x	x		x	x		x		x		x		x			
DESTINAÇÃO FINAL																		
Aterro Sanitário									Compostagem									
Fase de operação									Fase de encerramento									
Transporte	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Disposição dos resíduos no solo	Espalhamento e compactação dos resíduos	Recobrimento das atividades do aterro	Encerramento das atividades de maquinários e insumos	Cobertura vegetal das células de disposição	Transporte	Disposição dos resíduos no solo e mistura de matéria seca	Utilização de mão de obra	Utilização de maquinários e insumos	Movimentação da leira para promoção de aeração	Armazenagem	Transporte	Uso na agricultura			
	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	CONDICÃO INICIAL	EFEITOS	IMPACTOS
	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x			x	Movimentação do solo	Modificação na estrutura do solo Geração de ruído Afastamento de fauna	Alteração da qualidade do solo Poluição sonora Desequilíbrio trófico
	x	x		x	x		x			x	x	x				Compactação do solo	Aumento da permeabilidade do solo e proteção contra processos erosivos Aumento do escoramento superficial e de processos erosivos Geração de ruído Afastamento de fauna	Alteração da qualidade do solo Alteraçao da qualidade do solo Poluição sonora Desequilíbrio trófico
			x	x	x		x		x		x					Drenagem de águas pluviais	Aumenta da infiltração e proteção contra processos de assoreamento Aumento do escoramento superficial e de processos de assoreamento Desprendimento de partículas sólidas	Alteraçao da qualidade da água
			x	x					x		x					Geração de efluente	Carregamento de lixiviado de alta carga orgânica Percolação do lixiviado de alta carga orgânica	Alteraçao da qualidade da água Alteraçao da qualidade do solo
x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	Emissão de gases	Aumento da concentração de GEE na atmosfera Recuperação de gases de GEE na atmosfera com vegetação	Poluição atmosférica Alteraçoes climáticas
			x	x	x	x	x		x	x	x	x		x		Modificação da paisagem	Geração de ruído Atração de fauna oportunista Área de concentração de resíduos Geração de odores	Poluição sonora Desequilíbrio trófico Saúde Pública Alteraçao da qualidade do ar
x								x						x		Transporte terrestre	Geração de ruído Afastamento de fauna Atropelamento de fauna Aumento da concentração de GEE na atmosfera devido a queima de combustível	Poluição sonora Desequilíbrio trófico Perda de biodiversidade Alteraçao da qualidade do ar
	x	x				x			x	x	x		x		x	Alterações na dinâmica econômica	Oferta de emprego Impulsionamento do comércio local Valorização econômica do reaproveitamento do resíduo	Alteraçoes climáticas Movimentação da economia local