



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO ENGENHARIA CIVIL

VITOR BARBOSA LOUREIRO

AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO
SANITÁRIO NA CIDADE DE MANAUS/AM – ESTUDO DE CASO DE UMA ETE
CONDOMINIAL.

Manaus - AM
2021

VITOR BARBOSA LOUREIRO

AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO
SANITÁRIO NA CIDADE DE MANAUS/AM – ESTUDO DE CASO DE UMA ETE
CONDOMINIAL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.^a Dr.^a. Ellem Cristiane Morais de Sousa Contente

Manaus - AM
2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L892a Loureiro, Vitor
Avaliação de critérios para destinação final do lodo de esgoto sanitário na cidade de Manaus/AM – Estudo de caso de uma ETE condominial. / Vitor Loureiro . 2021
93 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ellem Cristiane de Sousa Contente
TCC de Graduação (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Estação. 2. Lodo. 3. Esgoto. 4. Tratamento. 5. Disposição final.
I. Contente, Ellem Cristiane de Sousa. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

VITOR BARBOSA LOUREIRO

AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DESTINAÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO
SANITÁRIO NA CIDADE DE MANAUS/AM – ESTUDO DE CASO DE UMA ETE
CONDOMINIAL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Manaus, __ de _____ de ____

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a. Ellem Cristiane de Sousa Contente - Presidente
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof.^a MSc. Jaqueline Maria Soares da Silva - Membro
Instituto Federal do Pará -IFPA/Campus Belém

Prof.^a Dr.^a. Maria de Nazaré Alves da Silva - Membro
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

À minha querida avó Alice (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a. Ellem Cristiane Morais de Sousa Contente, por todo apoio e auxílio necessário para a elaboração deste trabalho.

À minha mãe Carmen Barbosa, por todo amor, dedicação e sacrifícios que me permitiram chegar até esta etapa da minha vida.

À minha namorada, Alexandra Rocha, pelos momentos de companheirismo e pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus amigos, que me ajudaram e me acompanharam em todas as fases dessa jornada.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A sociedade atual vem se empenhando para a realização de ações que garantam um ambiente saudável e sustentável para as futuras gerações. Neste contexto, o gerenciamento do lodo, resíduo proveniente do tratamento de esgoto, vem se caracterizando como uma atividade de grande complexidade e alto custo, quando mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados. Existem inúmeras alternativas de destinação final do lodo, as mais comuns são: disposição em aterro sanitário, incineração, landfarming, recuperação de áreas degradadas, o uso agrícola e florestal. Nessa problemática, a cidade de Manaus ocupa uma posição de destaque negativo no panorama nacional, apresentando apenas 20% de índice de atendimento urbano de esgoto. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo analisar critérios que possam ser considerados na destinação final do lodo de ETE, a partir da identificação das principais alternativas e potencialidade de uso local, com a preposição de uma metodologia multicritério de auxílio à decisão, com um método capaz de hierarquizar de forma simplificada as alternativas de disposição final, em um estudo de caso de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de um condomínio localizado na cidade de Manaus. O estudo foi realizado em 6 (seis) etapas principais, além do levantamento teórico realizou-se o cálculo da estimativa de produção de lodo, a definição dos critérios, a definição dos pesos de apoio à decisão, a proposição de alternativas tecnológicas em consonância com a realidade da ETE de estudo. Para o auxílio da decisão, foi utilizada a ferramenta estatística Ponderação Aditiva Simples e construiu-se uma matriz de resultados com base nos dados levantados. Os resultados obtidos a partir da matriz e do método estatístico constataram que a alternativa de uso agrícola se mostra preferível em relação as demais indicadas no estudo. Entretanto, ressalta-se que todas as alternativas que apresentam algum tipo de reuso ou reciclagem do lodo apresentaram bons desempenhos. Por fim, pode concluir-se que os maiores obstáculos para a implementação do uso agrícola é o emprego de um processo de higienização do lodo, para atender aos padrões previstos na Resolução CONAMA Nº 375/2006 e a garantia da redução de umidade, visando a redução de custos com transporte e manejo do lodo.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Disposição final. ETE. Reuso. Uso agrícola.

ABSTRACT

Today's society has been striving to carry out actions that ensure a healthy and sustainable environment for future generations. In this context, the management of sludge, waste from sewage treatment, has been characterized as an activity of great complexity and high cost, when poorly executed, it can compromise the expected environmental and health benefits. There are numerous alternatives for the final disposal of the sludge, the most common being: disposal in landfills, incineration, landfarming, recovery of degraded areas, agricultural and forestry use. In this issue, the City of Manaus occupies a negatively prominent position in the national panorama, with only 20% of the urban sewage service rate. This way, the present work performed a preposition of a multi-criteria decision aid methodology, with a method capable of ranking in a simplified way the final disposal alternatives, for a case study of an Effluent Treatment Plant of a condominium located in the city of Manaus. The study was carried out in 5 (five) main stages, in addition to the theoretical survey, the definition of criteria and weights for decision support was carried out, as well as the proposition of technological alternatives in line with the reality of the study case. To aid in the decision, the Simple Additive Weighting statistical tool was used and a matrix of results was built based on the data collected. The results obtained from the matrix and the statistical method found that the alternative of agricultural use is preferable to all others. However, it is noteworthy that all alternatives that have some type of sludge reuse or recycling showed good performance. Finally, it can be concluded that the biggest obstacles to the implementation of agricultural use is the use of a sludge sanitation process, in order to meet the standards set out in CONAMA Resolution No. 375/2006 and the guarantee of moisture reduction, aiming at reducing costs with transport and sludge handling.

Keywords: Sewage sludge. Final disposal. Sewage treatment plants. Manaus. Agricultural use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Interação entre o material orgânico afluente e o lodo, em sistemas anaeróbios	20
Figura 2 — Processo de digestão aeróbia	22
Figura 3 — Etapas do gerenciamento de lodo	23
Figura 4 — Relação entre o volume e o teor de água do lodo	25
Figura 5 — Filtro prensa de placa	31
Figura 6 — Leito de secagem do lodo de esgoto gerado em estação de tratamento do esgoto	32
Figura 7 — Fluxograma do processo de compostagem	34
Figura 8 — Leiras revolvidas	35
Figura 9 — Leiras estáticas aeradas	36
Figura 10 — Aplicação de cal virgem no lodo de esgoto	37
Figura 11 — Sistema incinerador de Leito fluidizado	41
Figura 12 — Seção transversal esquemática de uma célula de landfarming	43
Figura 13 — Sistema de landfarming - Perspectiva superior	44
Figura 14 — Aplicação de lodo em área degradada	50
Figura 15 — Fluxograma das etapas de realização do trabalho	57
Figura 16 — Localização do Município de Manaus	58
Figura 17 — Comparativo dos Índices de esgoto tratado referido à água consumida	59
Figura 18 — Imagem da ETE localizada em condomínio de Manaus	61
Figura 19 — Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto	62
Figura 20 — Inter-relações entre as características do efluente líquido, tecnologia de tratamento do esgoto, processamento do lodo e alternativas de uso e destino final	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Classificação do lodo de ETEs	17
Quadro 2 — Utilização típica dos principais métodos de adensamento do lodo . . .	25
Quadro 3 — Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final	27
Quadro 4 — Efeitos dos processos de condicionamento nos lodos de ETEs	28
Quadro 5 — Dados para a estimativa da quantidade de lodo gerada	65
Quadro 6 — Lista de Critérios	66
Quadro 7 — Alternativas analisadas para a destinação final do lodo	78
Quadro 8 — Alternativas de disposição final sem uso benéfico	79
Quadro 9 — Alternativas de disposição final com uso benéfico	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Quantidade de lodo produzido nos sistemas de tratamento de esgoto	18
Tabela 2 — Composição química e propriedades típicas do lodo bruto e digerido	18
Tabela 3 — Teor de sólidos no resíduo do tratamento de esgoto	30
Tabela 4 — Temperatura e tempo de contato para a destruição de alguns organismos	33
Tabela 5 — Exemplos de variação de volume requerido no aterro (fator demanda), em relação ao teor de sólidos do lodo	40
Tabela 6 — Poder calorífico de diferentes tipos de lodo	40
Tabela 7 — Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado	46
Tabela 8 — Dados do empreendimento	69
Tabela 9 — Lista de critérios adotados	76
Tabela 10 — Matriz de alternativas de destinação do lodo	81
Tabela 11 — Classificação das alternativas de destinação final do lodo	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
ETE	Estação de tratamento de esgoto
LETE	Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto
N	Nitrogênio
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRFV	Polímero Reforçado em Fibra de Vidro
PROSAMIM	Programa Social e Ambiental dos Igarapés de Manaus
SEMMAS	Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SS	Sólidos Secos
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Aspectos gerais sobre o lodo de esgoto sanitário	16
3.1.1	Tipos de lodo	16
3.1.2	Características dos lodos de ETEs	18
3.1.2.1	Lodos produzidos em processos anaeróbios	19
3.1.2.2	Lodos produzidos em processos aeróbios	21
3.2	Manejo do lodo de ETE	23
3.2.1	Adensamento	24
3.2.2	Estabilização	26
3.2.3	Condicionamento	27
3.2.4	Desaguamento	29
3.2.4.1	Desaguamento mecânico	30
3.2.4.2	Desaguamento natural	31
3.2.5	Higienização	32
3.2.5.1	Compostagem	33
3.2.5.2	Calagem	36
3.2.5.3	Tratamento térmico	37
3.3	Destinação Final	38
3.3.1	Disposição em aterros sanitários	38
3.3.2	Incineração	40
3.3.3	<i>Landfarming</i>	42
3.3.4	Uso benéfico do lodo no solo	44
3.3.4.1	Uso agrícola do lodo	45
3.3.4.2	Recuperação de áreas degradadas	48
3.3.4.3	Uso do lodo em plantações florestais	50
3.3.4.4	Uso do lodo na produção de substrato vegetal	52
3.3.5	Uso benéfico do lodo na construção civil	54
4	MATERIAL E MÉTODOS	57
4.1	Contextualização da cidade de Manaus	58
4.2	Estudo de caso - ETE condominial	60
4.2.1	Caracterização da ETE	60
4.2.1.1	Tratamento preliminar - Pré-tratamento	62
4.2.1.2	Elevatória de Efluentes	63
4.2.1.3	Tratamento Primário - Fase Anaeróbia	63

4.2.1.4	Tratamento Secundário - Fase Aeróbia	63
4.2.1.5	Decantação	64
4.2.1.6	Desinfecção por Cloro	64
4.2.2	Destinação do Lodo da ETE	64
4.3	Estimativa da geração de lodo na ETE	65
4.4	Definição dos critérios e pesos para a avaliação	65
4.5	Construção da matriz de resultados	67
5	RESULTADO E DISCUSSÕES	69
5.1	Estimativa da produção do lodo da ETE em estudo	69
5.2	Análise dos critérios de avaliação e pesos	72
5.2.1	Critério ambiental	73
5.2.2	Crítérios Legais	74
5.2.3	Crítérios Econômicos	74
5.2.4	Crítérios Técnicos	75
5.2.5	Crítérios Social-Urbanos	76
5.3	Análise das alternativas de destinação final da ETE	77
5.4	Matriz de alternativas de destinação do lodo	81
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Com os crescentes esforços por melhores padrões de qualidade ambiental, a sociedade atual, gestores públicos e privados vem se empenhando para a realização de ações que garantam um ambiente saudável e sustentável para as futuras gerações. E dentre os inúmeros problemas ambientais existentes, acentuados pelo grande crescimento urbano, um dos que apresenta relevância na atualidade é o gerenciamento adequado dos milhões de toneladas de resíduos gerados pelo ser humano.

Neste contexto, o gerenciamento do lodo, resíduo proveniente do tratamento de esgotos (ANDREOLI, 2006), vem se caracterizando como uma atividade de grande complexidade e alto custo, quando mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas. Dessa forma, a disposição final vem ganhando significância no Brasil proporcionalmente ao crescimento do número de estações de tratamento de esgotos (ETEs) instaladas no país.

Associado a necessidade de atender às novas exigências ambientais, onde as novas diretrizes globais atuam no sentido da redução da produção, do aumento máximo da reutilização, da reciclagem e da promoção de tratamento ambientalmente correto. Estas demandas resultaram no desenvolvimento de novas tecnologias que buscam garantir a segurança e o bem-estar da população inserida neste meio.

Quanto mais complexo o sistema de tratamento de esgoto adotado, maior será a variabilidade do lodo produzido, desta forma a compreensão das variedades existentes é essencial para definição de seu tratamento mais adequado. Deve levar-se em consideração as características desejáveis para o resíduo, os requisitos de qualidade exigidos, o tipo de destinação escolhido e a redução de volume, objetivo almejado em todas as etapas do manejo.

A destinação final do lodo de estações de tratamento vem apresentando-se como uma das etapas mais problemáticas de todo processo operacional, à vista disso seu planejamento tem sido negligenciado, ainda mais considerando os custos envolvidos nesta fase, que podem alcançar até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento (BETIOL; CAMARGO, 2000). Atualmente existem inúmeras alternativas de destinação final do lodo, para a escolha do método mais adequado deve-se considerar as características do resíduo produzido.

Além disso, a busca pela reciclagem de resíduos na construção civil é uma prática que vem sendo estudada a algumas décadas. A incorporação do lodo na

linha de produção de algum material diminui os gastos com a matéria-prima que é geralmente utilizada, também apresenta vantagens ao meio ambiente, pois dá destinação ao resíduo e diminui qualquer risco de contaminação de recursos naturais.

A cidade de Manaus (AM), à luz dessas reflexões, ocupa uma posição de destaque negativo no panorama nacional, com seu crescimento urbano desordenado é possível observar a baixa disponibilidade de serviços de saneamento básico para a população devido a deficiente infraestrutura do município. Segundo o 25º diagnóstico dos serviços de água e esgotos de 2019 (BRASIL, 2020) a cidade apresenta apenas 20% de índice de atendimento urbano de esgoto, isto é, o índice que indica a parcela da população urbana que foi efetivamente atendida por rede coletora de esgoto (com ou sem tratamento) em relação à população residente.

O sistema de tratamento de efluentes a ser estudado é um empreendimento residencial localizado na zona centro-sul de Manaus, e este trabalho demonstra a necessidade de apontar alternativas seguras e inseridas no contexto local para o destino final do lodo de esgoto de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitário, pois se entende que vai além das obrigações legais e, se torna cada vez mais urgente, dada a suas características potenciais de contaminação no ambiente e sua relação com a saúde pública.

Outro aspecto inerente ao trabalho, está em demonstrar a necessidade de ações sustentáveis direcionadas a esse subproduto, já que possui potencialidades de aplicabilidade. Contudo, este trabalho surgiu com o objetivo de analisar critérios que possam ser considerados na destinação final do lodo de ETE, buscando identificar as principais alternativas e potencialidades de uso no contexto local.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar critérios para contribuir com a seleção e alternativas de destinação final do lodo de esgoto sanitário provenientes de ETE localizada em condomínio na cidade de Manaus.

Os objetivos específicos são:

- Descrever as principais alternativas da destinação do lodo de esgoto no cenário brasileiro;
- Identificar critérios utilizados na seleção de alternativas de destinação final do lodo aplicado ao estudo de caso;
- Indicar as alternativas potenciais de destinação do lodo de esgoto de ETE na cidade de Manaus.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aspectos gerais sobre o lodo de esgoto sanitário

Segundo Andreoli (2006), o termo lodo é utilizado para designar os sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgoto e quanto mais complexo o sistema de tratamento de esgoto adotado, maior será a variabilidade do lodo produzido, desta forma a compreensão das variedades existentes é essencial para definição de seu tratamento mais adequado.

Sob o aspecto normativo, o lodo de esgoto enquadra-se na definição de resíduos sólidos segundo a NBR 10004 (2004):

resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10004, 2004).

Portanto, tal classificação insere o lodo de esgoto nas diretrizes de gestão e gerenciamento vigentes na Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil, instituída pela Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010 (PNRS, 2010) onde busca fundamentalmente agregar valor à luz da sustentabilidade aos resíduos sólidos no âmbito nacional.

Nesse ensejo, considerando as características desejáveis para o lodo, os requisitos de qualidade exigidos, o tipo de destinação escolhido, e a redução de volume, objetivo perseguido em todas as etapas de manejo do lodo (BATISTA, 2015). Nos itens a seguir serão discutidos os principais aspectos para o correto manejo do lodo de esgoto de ETEs.

3.1.1 Tipos de lodo

O lodo distingue-se basicamente entre primário e secundário. O lodo primário é o material sedimentável do esgoto bruto, gerado nas etapas de tratamento primário, onde através de decantadores acontece o processo físico de sedimentação das partículas em suspensão. O lodo secundário é produzido nos sistemas de tratamento biológico, aonde parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, corresponde pela maior parte dos resíduos produzidos por uma ETE. Caso os dois tipos de lodo forem enviados para tratamento conjuntamente, tem-se o lodo misto.

Pode-se ter a presença do lodo químico, que ocorre em sistemas de tratamento onde foi incorporada uma etapa físico-química para melhorar a eficiência do decantador primário e do sistema na totalidade, e lodo excedente que é decorrente de sistemas onde a capacidade de armazenamento é menor do que a quantidade de lodo gerada durante a operação da estação (ex.: lagoas facultativas), ou ainda necessitem de descarte frequente (ex.: lodos ativados) (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001). No Quadro 1 segue classificação de ETE's. No Quadro 1 esta relacionado a classificação de ETEs.

Quadro 1 — Classificação do lodo de ETEs

Tipo de lodo	Origem	Características
Lodo primário bruto	Proveniente do tratamento primário do esgoto e obtido , normalmente, por sedimentação	Coloração acinzentada, é pegajoso, de odor desagradável e pode decompor-se facilmente
Lodo digerido	Processos de estabilização de lodos	Apresenta redução de SSV superior a 40% dependendo do processo empregado. Quando bem digerido não possui odor ofensivo
Lodo aeróbio não estabilizado	Sistemas de lodos ativados e em reatores aeróbios com biofilmes - alta carga	Compreende a biomassa de micro-organismos aeróbios, gerada nos processos metabólicos de degradação da matéria orgânica, descartada do sistema. Necessita de processo de digestão
Lodo aeróbio estabilizado	Lodos ativados com aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilmes - baixa carga	Constitui o lodo excedente, resultante de respiração prevalecente, com um menor teor de matéria orgânica e maior quantidade de sólidos inorgânicos, não havendo necessidade de uma etapa posterior de digestão
Lodo anaeróbio estabilizado	Processos de degradação da matéria orgânica, em condições anaeróbias. Ocorrência em reatores anaeróbios e no fundo de lagoas de estabilização	Lodo com menor teor de matéria orgânica, quanto melhor a digestão, menor o potencial de geração de odor
Lodo misto	Tratamento conjunto de lodos excedentes de origem em tratamentos primário e secundário	Sua características são uma composição dos lodos que lhe deram origem
Lodo químico	Produzido em estações de tratamento onde se tem uma etapa físico-química de tratamento da fase líquida	

Fonte: Adaptado de Andreoli, Sperling e Fernandes (2001)

3.1.2 Características dos lodos de ETEs

A quantidade de logo gerada pelos diversos tipos de tratamento de esgoto está diretamente ligada aos teores de sólidos e água (IMHOFF, 1986). Cada método apresenta suas características, e a produção de lodo varia conforme a metodologia aplicada, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 — Quantidade de lodo produzido nos sistemas de tratamento de esgoto

Tipos de sistemas	Volume de Lodo Produzido (L/hab.d)
Lagoas facultativas	0,05 - 0,15
Reator UASB	0,2 - 0,6
Lodos ativados convencionais	3,1 - 8,2
Aeração prolongada	3,3 - 5,6
Lagoa anaeróbia	0,1 - 0,3
Filtro biológico de alta carga	1,4 - 5,2
Lagoa aerada facultativa	0,08 - 0,22

Fonte: Metcalf e Eddy (2002)

O lodo é constituído, em boa parte, por bactérias vivas (BETIOL; CAMARGO, 2000). O bissólido formado através de tratamentos aeróbios, a depender da idade, a fração de massa bacteriana pode representar de 50% a 90% da biomassa, enquanto no lodo formado por processos anaeróbios, a fração está na faixa de 2 a 20% (CAMPOS, 1999).

Por convenção o lodo é designado com resíduo sólido, tendo em vista distingui-lo do fluxo de líquido que está em tratamento, entretanto na maior parte das etapas de seu manejo, em volume, o lodo é constituído por mais de 95% de água, em relação ao peso, a concentração de sólidos representa de 0,25 a 12% desta grandeza. Desta maneira é fundamental conhecer a composição físico-química do lodo, incluindo nutrientes para a definição da disposição final (MATCALF; EDDY, 1991). A Tabela 2 apresenta a composição química de diferentes tipos de lodo.

Tabela 2 — Composição química e propriedades típicas do lodo bruto e digerido (continua)

Item	Lodo bruto - Faixa	Lodo bruto - Tipo	Lodo digerido - Faixa	Lodo digerido - Tipo
pH	5,0 - 8,0	6,0	6,5 - 7,5	7,0
Alcalinidade (mg/L em CaCO)	500 - 1500	600	2500 - 3000	3000

Tabela 2 — Composição química e propriedades típicas do lodo bruto e digerido (conclusão)

Item	Lodo bruto - Faixa	Lodo bruto - Tipo	Lodo digerido - Faixa	Lodo digerido - Tipo
3)				
Ácidos orgânicos (mg/L em HAc)	200 - 2000	500	100 - 600	200
Sólidos totais (ST)	2 - 8	5	6 - 12	10
Sólidos voláteis (%ST)	60 - 80	65	30 - 60	40
Graxas e gorduras solúveis em éter (%ST)	6 - 30	-	5 - 20	18
Proteínas (%ST)	20 - 30	25	15 - 20	18
Nitrogênio (N, %ST)	1,5 - 4,0	2,5	1,6 - 6,0	3,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , %ST)	0,8 - 2,8	1,6	1,5 - 4,0	2,5
Potássio (K ₂ O, %ST)	0,0 - 1,0	0,4	0,0 - 3,0	1,0
Celulose (%ST)	8 - 15	10	8 - 15	10
Ferro (exceto na forma de sulfeto)	2,0 - 4,0	2,5	3,0 - 8,0	4,0
Sílica (SiO ₂ , %ST)	15 - 20	-	10 - 20	-

Fonte: Adaptado de Matcalf e Eddy (1991)

Em sistemas biológicos de tratamento de esgotos a degradação ou estabilização da matéria orgânica é realizada por uma massa de microrganismos. As bactérias representam a maioria desses organismos presentes no lodo, mas outros tipos de microrganismos, tais como vírus, protozoários, rotíferos e ciliados, também são comumente encontrados (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

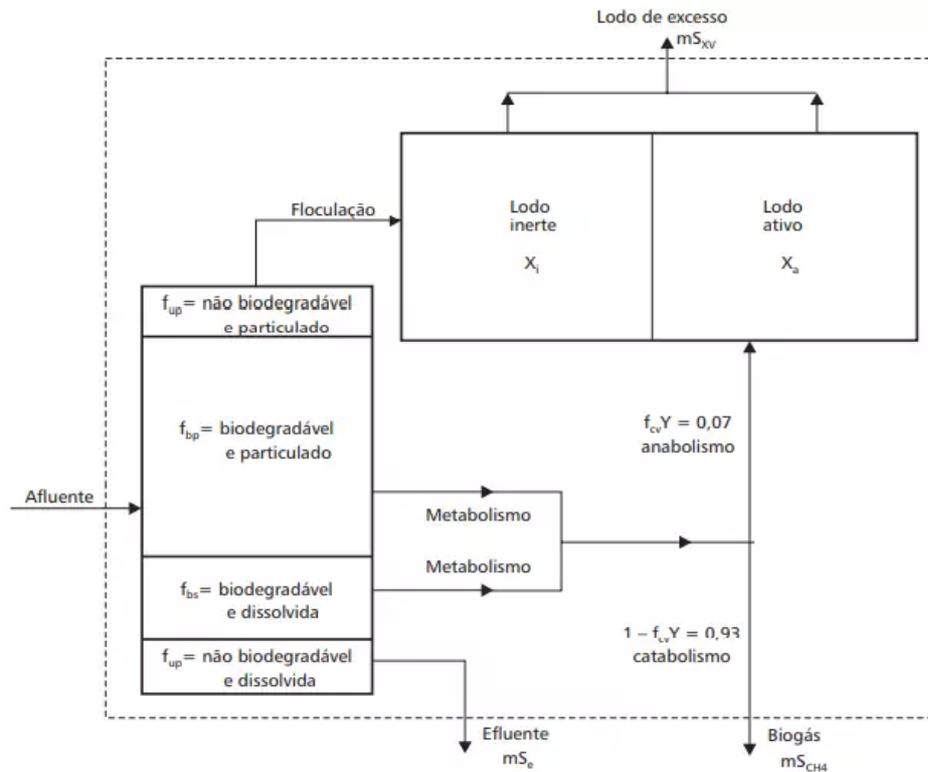
As bactérias usam o material orgânico tanto como fonte de material carbonáceo para a construção de seu material celular, como também fonte de energia (BITTON, 2001), sendo que o metabolismo bacteriano envolve processos que dependem especialmente do ambiente que se desenvolvem. Sendo assim, serão abordados nos próximos itens os fundamentos do tratamento aeróbio e anaeróbio.

3.1.2.1 Lodos produzidos em processos anaeróbios

Conforme Campos (1999) a digestão anaeróbia é um processo biológico, onde na ausência de oxigênio molecular, um conjunto de diferentes microrganismos que promovem a transformação de compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em produtos mais simples como gás carbônico e metano. A Figura 1 mostra a interação entre a massa bacteriana e o material orgânico afluente

para o caso de sistemas anaeróbios de tratamento.

Figura 1 — Interação entre o material orgânico afluente e o lodo, em sistemas anaeróbios



Fonte: Andreoli (2001, p. 10)

Para Van Haandel e Alem Sobrinho (2006), as frações de lodo podem ser divididas em quatro partes:

- f_{us} ou fração solúvel e não biodegradável ($\pm 10\%$ em esgoto bruto);
- f_{up} ou fração particulada e não biodegradável ($\pm 8\%$ em esgoto bruto);
- f_{bs} ou fração solúvel e biodegradável ($\pm 20\%$ em esgoto bruto); e
- f_{bp} que é a fração particulada e biodegradável ($\pm 62\%$ em esgoto bruto).

Van Haandel, Cavalcanti e Andreoli (2001) afirmam que os fatores que influenciam na fração do efluente que é convertida em lodo nos processos anaeróbios estão relacionados a:

- Natureza do material orgânico biodegradável do afluente. A composição do material orgânico depende da origem da água residuária: se houver uma fração elevada de material particulado, então, haverá uma tendência a ter mais material biodegradável e particulado no lodo, aumentando a produção de lodo e a fração de material biodegradável neste;

- Parâmetros ambientais do sistema. A temperatura é importante porque influencia diretamente a taxa de todos os processos biológicos que se desenvolvem, tendo-se uma taxa máxima na faixa de 30 a 37°C, sendo, porém, possível operar sistemas anaeróbios para temperaturas acima de 18°C. Quando a temperatura é menor que a ótima, os processos metabólicos se desenvolvem mais lentamente. O pH deve ficar na faixa neutra para que a metanogênese não seja prejudicada.
- A idade de lodo. Quanto maior a idade de lodo, mais completa é a remoção do material orgânico biodegradável, todavia, uma idade longa de lodo significa que a massa de lodo acumulada terá de ser grande, e isto só pode ser realizado em um sistema com um dispositivo eficiente de retenção de lodo e um volume grande para acumulação do lodo retido. Portanto, a eficiência de retenção de lodo é um fator de primordial importância no projeto de sistemas de tratamento;
- Contato entre o lodo e o material orgânico do afluente. Independente da idade de lodo, é importante que haja uma boa intensidade de contato entre o material orgânico afluente e a massa bacteriana no sistema de tratamento, a fim de que o metabolismo possa de fato ocorrer. Embora esta condição pareça muito óbvia, na prática há muitos sistemas em que este contato é limitado (tanque séptico, lagoa anaeróbia) ou até mesmo impossível (tanque Imhoff).

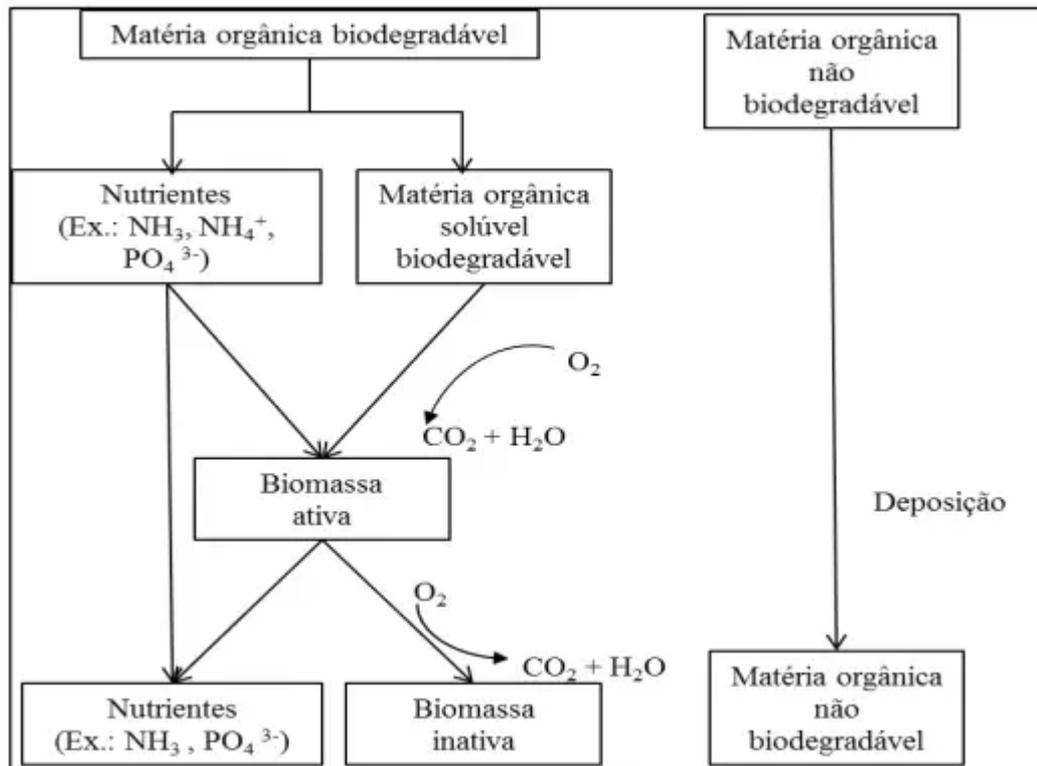
Luna et al. (2019) apresenta algumas das vantagens desse tipo de tratamento, como a:

Redução do volume de lodo pela retirada da água, transformação da matéria orgânica altamente putrescível em matéria orgânica relativamente mais inerte, ou em resíduo inorgânico, recuperação de energia na forma de metano, e, finalmente, promove uma condição para disposição adequada segundo as normas vigentes.

3.1.2.2 Lodos produzidos em processos aeróbios

Grady, Daigger e Lim (1999) explicam que a operação de digestão aeróbia consiste na conversão da matéria orgânica biodegradável solúvel em dióxido de carbono, água, biomassa ativa através da ação de bactérias heterotróficas. Por sua parte a biomassa ativa é degradada, produzindo dióxido de carbono, água e biomassa inativa, entretanto a matéria orgânica não biodegradável presente no esgoto não é abrangida por esse processo de digestão e constitui uma série de sólidos digeridos (Figura 2).

Figura 2 — Processo de digestão aeróbia



Fonte: Adaptado de Grady, Daigger e Lim (1999, p. 562)

Andreoli (2001) afirma que as considerações sobre o lodo produzido em sistemas de tratamento aeróbio são mais complicadas devido a três fatores:

1. O decaimento de lodo é expressivo, há grande demanda de oxigênio para a respiração endógena e reprodução dos microrganismos;
2. O lodo ativo é instável, isto está relacionado com a morte dos microrganismos após o fim da aeração. Desta forma, o lodo produzido em um sistema aeróbio é introduzido em um digestor anaeróbio para redução da massa bacteriana aeróbia;
3. Há produção de diferentes tipos de lodo, o lodo primário e o secundário, aqui anteriormente abordados.

Por ser mais instável, o lodo deve ser digerido, desta forma, a depender da idade, o processo de digestão pode tornar-se autossuficiente energeticamente, principalmente se o metano gerado pela degradação do lodo for utilizado para garantir o funcionamento das bombas aeradoras (VAN HAANDEL; CAVALCANTI; ANDREOLI, 2001).

3.2 Manejo do lodo de ETE

Normalmente o termo “manejo” está ligado ao uso de algo com o auxílio das mãos, ou ao ato, ou efeito de manusear. No âmbito das ciências ambientais e de saneamento podemos descrevê-lo como: as atividades envolvidas em um processo, as etapas de funcionamento, a manuseabilidade de um produto (ANDREOLI, 2009). Nesta lógica consideraremos o manejo do lodos de ETE as atividades envolvidas nos processos de tratamento e disposição final deste resíduo.

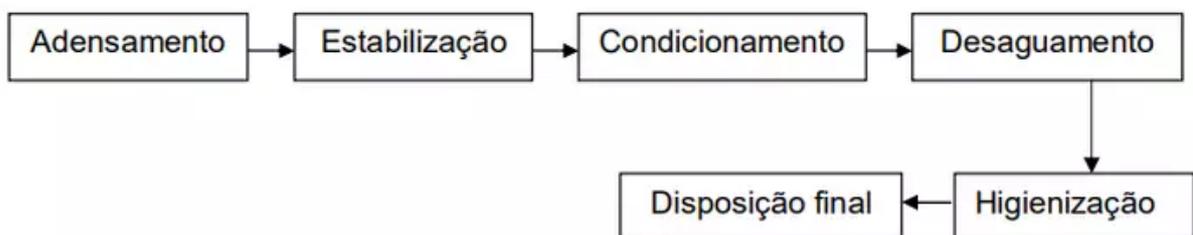
O tratamento dos lodos de ETE vem ganhando significância no Brasil proporcionalmente ao crescimento do número de ETEs instaladas no país, outro fator preponderante foi a necessidade de atender as novas às exigências ambientais. Estas demandas resultaram no desenvolvimento de novas tecnologias que garante a segurança e o bem-estar da população inserida neste meio.

Ainda sobre o tratamento e disposição final do lodo, Batista (2015) ressalta:

Em função dos riscos inerentes, para a saúde humana e para o meio ambiente, de sua má destinação e disposição final, é preciso critério e cautela na escolha dos processos a serem adotados, nestas etapas do tratamento. O custo é um fator importante, mas há que se cuidar para que, buscando reduzir o custo de disposição, não se incorra em maiores custos sociais e ambientais

Como já abordado, sabemos que o lodo muda de característica conforme o processo de tratamento de esgoto adotado, mas de forma geral o gerenciamento deste produto deve incorporar as etapas elencadas na Figura 3 (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Figura 3 — Etapas do gerenciamento de lodo



Fonte: Adaptado de Mendes (2012)

Andreoli, Sperling e Fernandes (2001) apresentam os objetivos de cada uma das etapas:

- Adensamento: redução de umidade (redução de volume)
- Estabilização: remoção da matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
- Condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente

mecânica)

- Desaguamento: remoção de umidade (redução de volume)
- Higienização: remoção de organismos patogênicos
- Disposição final: destinação final dos subprodutos

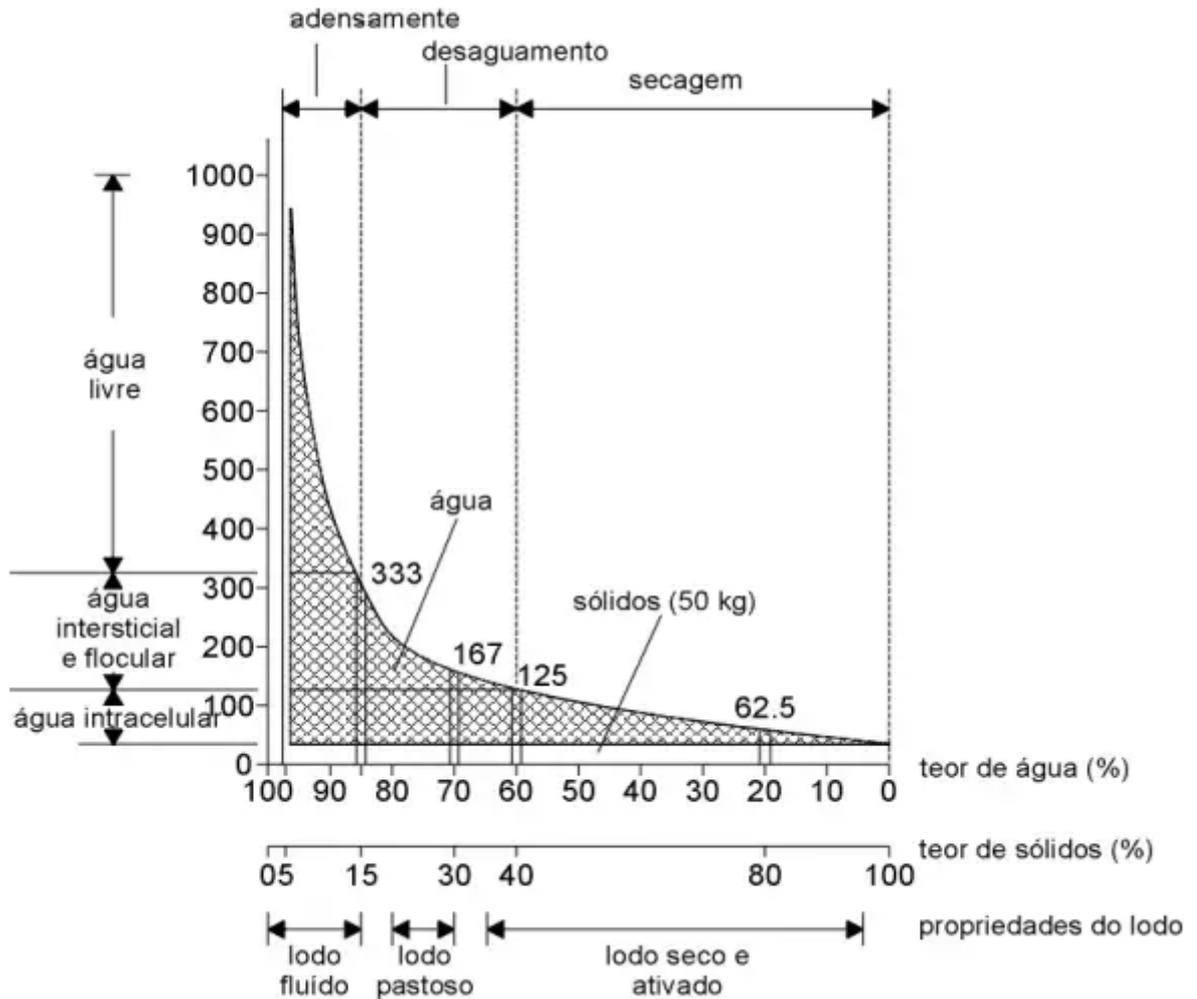
3.2.1 Adensamento

O adensamento ou espessamento é um processo físico de concentração de sólidos, que tem por objetivo a redução da umidade do lodo, ocorre através da remoção parcial de água e em consequência há redução da capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento, como o volume dos digestores, o dimensionamento das bombas, o consumo de produtos químicos no desaguamento e redução do consumo de energia no aquecimento dos digestores (PEDROZA et al., 2010).

A depender do processo de tratamento de esgoto adotado, faz-se necessário ou não a etapa de adensamento, mas normalmente, numa estação convencional de nível secundário, o lodo gerado possui uma elevada quantidade de água, a exemplo do lodo primário gerado nos decantadores primários e o lodo secundário gerado nos processos de filtro biológico, lodos ativados, dentre outros (ANDREOLI, 1999). Em reatores UASB esta etapa não é necessária (SAITO, 2013).

Por meio da Figura 4, tem-se a relação entre o volume e o teor de água do lodo. Observa-se que a porcentagem de teor de sólidos é exponencialmente inversa a porcentagem do teor de água, ou seja, uma pequena variação da umidade já implica num grande aumento do teor de sólidos e considerável redução de volume do lodo.

Figura 4 — Relação entre o volume e o teor de água do lodo



Fonte: Andreoli (1999, p. 14)

Os tipos de adensamento mais utilizados são os: por gravidade, flotação com ar dissolvido, centrífuga, adensador de esteira, tambor rotativo (Quadro 2).

Quadro 2 — Utilização típica dos principais métodos de adensamento do lodo (continua)

Método de adensamento	Tipo de lodo	Comentário
Gravidade	Primário	Frequentemente utilizado, com ótimos resultados
Gravidade	Lodo ativado	Utilização menos frequente, devido ao reduzido incremento no teor de sólidos
Gravidade	Lodo misto (lodo primário e lodo ativado)	Frequentemente utilizado
Gravidade	Lodo misto (lodo primário e lodo de reator aeróbio com biofilme)	Frequentemente utilizado

Quadro 2 — Utilização típica dos principais métodos de adensamento do lodo (conclusão)

Método de adensamento	Tipo de lodo	Comentário
Flotação por ar dissolvido	Lodo misto (lodo primário e lodo ativado)	Utilização menos frequente, já que os resultados são similares aos de adensadores por gravidade
Flotação por ar dissolvido	Lodo ativado	Frequentemente utilizado, com resultados bem superiores aos do adensamento por gravidade
Centrífugas	Lodo ativado	Utilização crescente
Prensas desaguadoras (filtro prensa de correias)	Lodo ativado	Utilização crescente

Fonte: Gonçalves e Ludovice (2014, p. 159)

3.2.2 Estabilização

A etapa de estabilização de lodos envolve processos físicos, químicos e biológicos, e tem por objetivo a atenuação ou eliminação de agentes patogênicos, eliminação dos maus odores e inibição, redução ou eliminação do potencial de putrefação (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

À medida que o lodo “fresco” sofre os processos de biotransformação, há a modificação dos componentes orgânicos mais facilmente biodegradáveis, o lodo passa a ter características de “estabilizado”, apresentando odor menos ofensivo e certa diminuição no teor de microrganismos patogênicos, em geral, através de processos biológicos, temos eficácia na remoção dos odores, porém o lodo permanece com elevados níveis de patógenos (LUDUVICE, 2014).

Batista (2015) afirma que o grau de estabilização do lodo ao deixar um sistema de tratamento de esgoto depende da tecnologia de tratamento utilizada, portanto, é importante que ainda na fase de projeto da estação, devem ser determinados os objetivos da estabilização do lodo fixados conforme a destinação final prevista.

As tecnologias para estabilização do lodo são: digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, estabilização química e estabilização térmica (Quadro 3). E dentre as citadas, a digestão anaeróbia e aeróbia, abordadas aqui anteriormente, são os métodos de estabilização mais utilizados, sendo a primeira utilizada em estações de tratamento de esgoto de porte médio a grande e a segunda em ETEs de pequeno porte. Em situações de parada de funcionamento, a estabilização química com cal pode ser usada como um substituto alternativo do processo biológico.

Quadro 3 — Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final

Processo de tratamento	Uso ou método de disposição final
Digestão anaeróbia / aeróbia	Produz biossólido apto para ser utilizado com restrições na agricultura, como condicionador de solo e fertilizante orgânico. Usualmente seguido de desaguamento. Necessita de pós-tratamento por higienização para utilização irrestrita na agricultura
Tratamento químico (alcalinização)	Utilizado na agricultura ou na cobertura diária de aterro sanitário
Compostagem	Produto tipo terra vegetal apropriado para utilização em viveiros, horticultura e paisagismo. Usualmente adotado após desaguamento do lodo
Secagem térmica	Produto com elevado teor de sólidos, significativa concentração de nitrogênio e livre de patógenos. Indicado para uso irrestrito na agricultura

Fonte: Andreoli, Sperling e Fernandes (2001, p. 122)

Para Van Haandel e Alem Sobrinho (2006) a digestão anaeróbia é o processo fermentativo que apresenta maiores benefícios para o tratamento de lodos, visto que os produtos deste processo (dióxido de carbono e metano) não são suscetíveis a outras fermentações, além disso, caso estes tipos de digestores sejam operados em condições adequadas, há grande redução no teor de coliformes fecais, todavia os ovos de helmintos resistem a este procedimento, indicando ser um processo limitado em relação à redução de patógenos, o que impõem limites a sua utilização.

A digestão aeróbia ainda é pouco difundida no país, tem sua utilização limitada à estabilização do excesso de lodo ativado oriundo de ETEs com remoção biológica de nutrientes, este processo acontece através da utilização de ar difuso ou aeradores mecânicos (LUDUVICE, 2014). Indica-se que o lodo passe por algum processo de adensamento antes de ser encaminhado para a digestão propriamente dita. Apresenta desvantagem em relação à digestão anaeróbia devido ao alto custo operacional de energia necessária para a aeração.

3.2.3 Condicionamento

O condicionamento do lodo é uma etapa anterior ao desaguamento e influencia diretamente na eficiência dos processos mecanizados. O condicionamento pode ser realizado através da utilização de produtos químicos orgânicos e inorgânicos ou tratamento térmico.

Esta etapa tem por objetivo melhorar as características de separação da fase sólido-líquida, aumentando o tamanho das partículas no lodo, envolvendo as partículas em agregados de partículas maiores. Isso acontece através de um processo de coagulação seguido de floculação, o condicionamento neutraliza ou

desestabiliza as forças químicas, ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão imersos no líquido, permitindo que as partículas menores floculem, formando agregados maiores (ANDREOLI, 2006). Os principais coagulantes utilizados são os sais metálicos, a cal e os polímeros orgânicos (polieletrólitos). Os coagulantes inorgânicos mais comuns são cloreto férrico e cal

Por meio desta etapa a operação de desaguamento consegue reduzir significativamente a umidade do lodo gerado em ETEs. Conforme Pedroza et al. (2010), o condicionamento químico é o método mais comumente utilizado, aplicado seguido do desaguamento, pode auxiliar a redução da umidade do lodo de 90 a 99% para 65 a 80%, a depender dos sólidos tratados, enquanto o condicionamento físico e térmico apresentam taxas menores de remoção de umidade. Outros efeitos dos processos de condicionamento no lodo de ETEs são mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 — Efeitos dos processos de condicionamento nos lodos de ETEs

Tipo de condicionamento	Mecanismo	Efeito da carga admissível de sólidos	Efeito no sobrenadante	Efeito nos recursos humanos	Efeito na massa de lodos
Com produtos inorgânicos	Coagulação e floculação	Permite aumento da carga no processo	Aumenta a captura de sólidos	Pequeno efeito	Aumenta significamente
Com produtos orgânicos	Coagulação e floculação	Permite aumento da carga no processo	Aumenta a captura de sólidos	Pequeno efeito	Nenhum
Tratamento térmico	Altera as propriedades de superfície, rompe células, libera produtos químicos e causa hidrólise	Permite significativo aumento da carga no processo	Aumenta significamente a cor, SS, DBO filtrada, N-NH ₃ e DQO	Aumento significativo	Reduz a massa presente, mas pode aumentar a massa através da recirculação

Fonte: Gonçalves e Ludivice (2014, p. 171)

Ainda sobre o condicionamento do lodo, Gonçalves e Ludivice (2014)

afirmam:

A quantidade de produto condicionador a ser utilizada depende das características do lodo a ser desaguado e dos processos mecânicos que compõem a etapa de condicionamento. O nível de hidratação e o conteúdo de partículas finas do lodo podem ser alterados pelo tipo de transporte por tubulações até uma central de processamento, pela estocagem durante um fim de semana e pela estocagem por períodos prolongados. Tais fatores modificam as características do lodo e aumentam a demanda de condicionadores previamente à desidratação.

3.2.4 Desaguamento

A etapa de desaguamento ou desidratação do lodo, é um dos processos de tratamento do lodo cujo objetivo reduzir o volume de lodo por meio da redução de seu teor de umidade, produzindo um material com características mecânicas próximas as dos sólidos. Conforme Aisse et al. (1999), podem ser adotados processos mecânicos e naturais. As operações mecanizadas consistem em mecanismos como a compactação, centrifugação ou filtração, para acelerar o desaguamento.

Para Metcalf e Eddy (2002) os principais motivos para realizar a desidratação do lodo são:

- Redução do volume do lodo, obtêm-se a redução nos custos de transporte para o local de disposição final;
- Facilidade na manipulação do lodo, comparado ao lodo adensado ou líquido;
- Maior eficiência na incineração;
- Reuso na agricultura ou disposição em aterro sanitário.

A escolha do processo de desidratação depende da área disponível e do tipo de lodo produzido (GONÇALVES; LUDIVICE, 2014). Para ETEs de pequeno porte localizadas em regiões sem restrição quanto à área, processos naturais como leitos de secagem e lagoas de secagem são considerados as alternativas mais viáveis. Da mesma forma, ETEs de médio e grande portes situadas em regiões urbanas com menor área disponível, utilizam-se da desidratação mecânica. Os principais processos utilizados para a desidratação natural ou mecânica em no Brasil são:

- Leitos de secagem;
- Lagoas de lodos;
- Centrífugas;
- Prensas desaguadoras;
- Filtro-prensa.

A Tabela 3 relaciona o teor de sólidos no resíduo obtidos através dos principais processos de desaguamento utilizados.

Tabela 3 — Teor de sólidos no resíduo do tratamento de esgoto

Tipo de estabilização	Desaguamento	Teor de sólidos no resíduo (%)
Digestão Anaeróbia	Filtro prensa de placas	30 a 40
	Filtro prensa de esteiras	16 a 25
	Centrífugas	25 a 30
	Leitos de secagem	20 a 30
Digestão Aeróbia	Filtro prensa de placas	25 a 35
	Filtro prensa de esteiras	13 a 18
	Centrífugas	20 a 25
	Leitos de secagem	25 a 30

Fonte: Alem Sobrinho (2001)

3.2.4.1 Desaguamento mecânico

A remoção de água no desaguamento mecânico é parcial, a depender das características do lodo e das condições operacionais, é possível obter um produto final com um teor de sólidos entre 15 e 35 %. Para sua disposição final, a torta produzida apresenta inconveniências, não somente pela presença de patógenos, mas também por sua constituição semi-sólida (BATISTA, 2015).

Sobre os processos mecanizados de desaguamento, Andreoli et al. (2003) sintetiza:

Os processos mecânicos ou artificiais para secagem do lodo são os filtro-prensa, que são constituídos de placas entre as quais se prendem os panos filtrante, a prensa contínua de esteiras, que apresenta duas correias sem fim em movimento contínuo, das quais pelo menos uma é constituída por uma tela filtrante, os filtros a vácuo, nos quais o lodo é aspirado de fora para dentro e fica retido em um pano, e as centrífugas, que têm por objetivo separar os sólidos da água por diferença de força centrífuga.

Na Figura 5 podemos ver um exemplo de filtro de prensa de placa.

Figura 5 — Filtro prensa de placa



Fonte: Neumann (2015)

3.2.4.2 Desaguamento natural

No desaguamento natural, lagoas de secagem e leitos de secagem são os métodos mais comuns de desidratação do lodo. Em essência os leitos funcionam como filtros granulares de elevadas quantidades de lodo (PEDROZA et al., 2003). Os meios naturais utilizam-se dos processos de evaporação e percolação como principais instrumentos de remoção de água. Percentualmente, a retira de água é maior pela percolação, mas a evaporação é necessária para que se produza um lodo de alto teor de sólidos (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

A respeito dos processos de desaguamento natural, Andreoli et al. (2003) comenta:

Os sistemas naturais de secagem dividem-se em *leitos de secagem*, que são geralmente unidades retangulares onde se processam a redução da umidade associada à drenagem e a evaporação da água liberada durante o período exposto à secagem, e as lagoas de secagem, que têm finalidade e funcionamento idênticos aos dos leitos, porém com dimensionamentos, detalhes construtivos e operação um pouco diferenciados.

O sistemas naturais são dependentes do clima, aspecto que favorece sua adoção em regiões quentes e secas. O lodo também deve estar bem digerido para facilitar a drenagem e não provocar problemas com odores.

Na Figura 6 podemos ver um exemplo leito de secagem do lodo de esgoto.

Figura 6 — Leito de secagem do lodo de esgoto gerado em estação de tratamento do esgoto



Fonte: Sanepar (1997)

3.2.5 Higienização

Um dos constituintes mais preocupantes no tratamento de esgoto são os microrganismos patogênicos. Bactérias, vírus, protozoários, helmintos e seus ovos estão presentes nos lodos, e uma considerável parte deles são responsáveis por diversas doenças (PINTO, 2014). Vale salientar que, apesar do processo de estabilização do lodo propiciar a redução de microrganismos patógenos, a concentração ainda é muito grande, muitos parasitas intestinais e seus ovos são pouco afetados pelos processos convencionais de digestão, tendo a necessidade de uma etapa complementar para significativa inativação dos mesmos, chamada higienização (FORESTI et al., 1999).

Assim, inserir um processo de higienização de lodos em estações de tratamento de efluentes tem por objetivo eliminar ou reduzir significativamente o nível de microrganismos, estabelecendo um nível de patogenicidade no lodo que, ao ser disposto no solo, não cause riscos à saúde da população, aos trabalhadores que vão manuseá-lo e impactos negativos ao meio ambiente (PINTO, 2014), tornando o produto final biologicamente seguro para as diferentes aplicações desejadas (PASSAMANI; KELLER; GOLÇALVES, 2002). Desta forma, a implantação de um sistema complementar de higienização de lodos está sujeito à alternativa adotada de disposição final deste resíduo sólido

A *Environmental Protection Agency* - EPA (1992) dispôs sobre o grau de higienização do lodo e definiu:

- Ser muito importante para a sua utilização na agricultura;

- Moderadamente importante para a disposição em aterro sanitário e transporte em geral;
- Ser sem importância quando a incineração ou disposição oceânica são seus destinos finais.

Na Tabela 4 podemos verificar a temperatura e o tempo de contato para inativação de alguns microrganismos.

Tabela 4 — Temperatura e tempo de contato para a destruição de alguns organismos

Organismo	Tempo (minuto)	Temperatura (°C)
<i>Salmonella typhi</i>	30	46
<i>Salmonella spp.</i>	15 a 30	60
<i>Shigella</i>	60	55
<i>Escherichia coli</i>	15 a 20	60
<i>Entamoeba histolytica</i>	instantâneo	68
<i>Taenia saginata</i>	5	71
<i>Trichinella spiralis</i>	60	50
<i>Necator americanus</i>	50	45
<i>Brucella abortus</i>	50	45
<i>Streptococcus fecalis</i>	60	70
<i>Coliformes fecalis</i>	60	70
<i>Ascaris spp.</i>	60	55

Fonte: Pedroza et al. (2003, p. 154)

Dentre os métodos de higienização conhecidos, a compostagem, a calagem e o tratamento térmico destacam-se por serem os processos mais economicamente viáveis e com maior facilidade operacional (BATISTA, 2015). Eles baseiam-se na alteração das condições químicas e físicas do material, principalmente pH e temperatura, que quando ultrapassadas as faixas nas quais os organismos se mantêm vivos, estes são eliminados. A eficiência da desinfecção é determinada pela intensidade e o tempo em que estes fatores são impostos à massa de lodo.

3.2.5.1 Compostagem

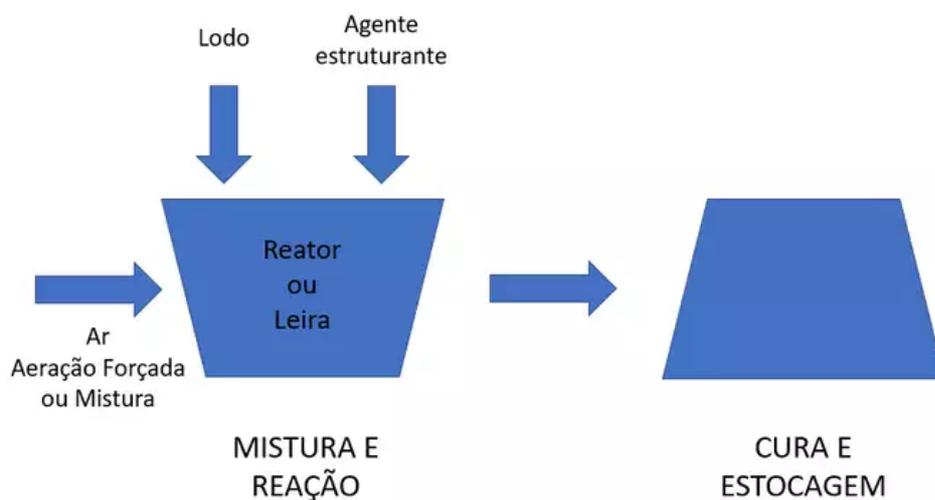
A compostagem é um processo de decomposição da matéria orgânica, acontece através da bio-oxidação aeróbia exotérmica do material, ocasionada pelo aumento da temperatura na fase de maior atividade do processo (FORNARI, 2001). Tanto o lodo bruto quando o lodo digerido podem ser compostados. Para atingir as

condições ambientais e os parâmetros de controle, é necessária a adição de agentes estruturantes à mistura do lodo, dentre eles podemos citar materiais como cavacos de madeira, folhas, resíduos verdes, palha de arroz, serragem, entre outros.

As principais condições ambientais e parâmetros de controle para se obter um eficiente processo de compostagem são:

- a. O equilíbrio entre a relação carbono/nitrogênio, segundo Van Oorschot, Waal e Simple (2000) a relação ideal deve estar na faixa de 26 a 31. O carbono representa a fonte de energia do processo e o nitrogênio é necessário para a reprodução das bactérias, ou seja, um desequilíbrio nessa relação implicará num processo de compostagem inadequado.
- b. A estrutura física dos materiais estruturantes deve ter dimensões na ordem de 1 a 4cm, visando o aumento dos espaços vazios para melhor distribuição do ar, visto que os lodos de esgoto apresentam granulometria muito fina.
- c. Umidade deve estar na faixa de 50 a 60%, valores menores inibem a atividade bacteriana e valores maiores impedem a livre passagem do ar
- d. A temperatura deve manter-se entre 40°C e 60°C nos três primeiros dias, na fase termófila a temperatura ideal deve ficar na faixa de 55°C a 65°C.
- e. O pH do ambiente deve manter-se na faixa de 6,5 a 9,0, contudo, se a relação C/N for adequada, o pH não será um fator crítico (FERNANDES, 2000). Na Figura 7 podemos ver como se dá o processo de compostagem.

Figura 7 — Fluxograma do processo de compostagem



Fonte: Adaptado de Pinto (2014, p. 268)

De acordo com Pinto (2014) o processo de compostagem ocorre em três etapas básicas:

- *Fase Inicial Mesófila*. Nesta fase ocorre um rápido crescimento de microrganismos mesófilos, com um gradativo aumento da temperatura.
- *Fase Termófila*. À medida que a temperatura aumenta, os microrganismos mesófilos diminuem, dando lugar às bactérias e fungos termófilos, de extrema atividade e capacidade de reprodução, que aumentam mais a temperatura, inativando microrganismos patogênicos presentes no lodo.
- *Fase Final Mesófila*. À medida que o substrato orgânico se esgota, a temperatura diminui, levando a população de bactérias termófilas à redução, possibilitando novamente que bactérias mesófilas voltem a se instalar, porém com atividade mais moderada, devido ao esgotamento do substrato orgânico.

Dentre os principais métodos de compostagem podemos destacar dois, as leiras revolvidas e as leiras estáticas aeradas. No processo de leiras revolvidas, a mistura é disposta ao ar livre em longas leiras, naturalmente aeradas, mecanicamente revolvidas e misturadas em intervalos de 15 dias (USEPA, 1994). O processo completo leva cerca de 50 a 90 dias para ficar estabilizado. A leira estática aerada, difere-se do processo anterior, neste método a mistura é disposta em cima de uma rede tubular perfurada por onde a aeração é realizada de forma mecanizada. Em geral, o processo se completa em cerca de 30 a 60 dias. Nas Figuras 8 e 9 são ilustrados exemplos dos dois tipos de leiras (ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE ITU, 2016) e (UFSC, 2013).

Figura 8 — Leiras revolvidas



Fonte: Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Itu (2016)

Figura 9 — Leiras estáticas aeradas



Fonte: UFSC (2013)

Segundo Andreoli et al. (2006), a compostagem é uma alternativa de custo elevado quando instalada e operada em pequenos sistemas, tornando-se muito complicada no ponto de vista operacional, já que este método é dependente de resíduos estruturantes externos à produção do lodo, desta forma a compostagem torna-se uma opção mais viável quando analisada como solução centralizada de higienização.

3.2.5.2 Calagem

Calagem é o termo utilizado para a desinfecção do lodo por meio da adição de cal virgem ou cal hidratada, em proporções que variam de 30 a 50% do peso seco do lodo (ANDREOLI, 1999). O contato entre a cal e a água livre do lodo provoca uma reação exotérmica, ocasionando aumentos de temperatura para a faixa dos 60°C, em seguida há uma rápida elevação do pH para níveis de 12 (LOURENÇO, 1997). Este processo é extremamente eficiente, resulta num biossólido com taxas de microrganismo patogênicos abaixo dos limites de detecção (PINTO, 2014).

Para que a redução de patógenos atinja seu nível ótimo, faz-se necessária a garantia do tempo de contato adequado entre o lodo e a cal. De acordo com Saito (2013) este período pode variar entre 30 a 120 dias, a depender das características do lodo e da dosagem de cal. Vale lembrar que durante todo esse período deve-se

chegar se os valores do pH encontram-se acima de 12, em geral, haverá a necessidade de adição de mais cal para manter a mistura dentro desses valores.

A otimização e padronização dos procedimentos de calagem são necessários e imprescindíveis para que este método de higienização seja incorporado às estações de tratamento de esgoto. A correta mistura da cal com o lodo é condição básica para obtenção de um resultado satisfatório, uma das alternativas é a utilização de betoneiras ou retroscavadeiras, comumente utilizadas na construção civil. Na Figura 10 tem-se uma ilustração de aplicação de cal virgem no lodo de esgoto

Figura 10 — Aplicação de cal virgem no lodo de esgoto



Fonte: Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Itu (2016)

Esta tecnologia caracteriza-se por ser muito fácil e simples de ser utilizada, não necessitando de grandes investimentos ou equipamentos muito sofisticados (MÄDER NETTO et al.). É uma alternativa muito viável para ETEs de pequeno porte e com disponibilização de área, para outras situações faz-se necessária uma avaliação mais minuciosa de sua viabilidade econômica.

3.2.5.3 Tratamento térmico

Os processos de tratamento térmico consiste no aquecimento do lodo por uma fonte de calor, provocando a evaporação da umidade do resíduo e alcançando a inativação térmica dos microrganismos. A depender da tecnologia adotada e das características do lodo, a temperatura e o tempo de aquecimento variam, mas de forma geral estes processos reduzem efetivamente os vírus patogênicos, bactérias e ovos de helmintos a níveis abaixo dos detectáveis (PEDROZA et al., 2010).

Este tipo de tratamento vem tornando-se viável através do uso de biogás produzido nas próprias estações de tratamento de esgotos anaeróbias, nesse caso o tratamento é feito a temperaturas que giram em torno dos 150°C. O poder calorífico do biogás é de 22 MJ/litro e os queimadores em geral possuem eficiência de 70%, sendo necessário 0,17 litros de biogás para a evaporação de 1 kg de água (PINTO, 2014).

3.3 Destinação Final

A disposição final do lodo de estações de tratamento vem apresentando-se como uma das etapas mais problemáticas de todo processo operacional, à vista disso seu planejamento tem sido negligenciado, ainda mais que os custos envolvidos nesta fase podem alcançar até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento (BETIOL; CAMARGO, 2000). Hoje em dia existem inúmeras alternativas de destinação final do lodo, para a escolha do método mais adequado deve-se considerar as características do resíduo produzido.

Segundo Ferreira (1999) para a escolha sobre a forma e local de destino final do lodo, os seguintes aspectos devem ser conhecidos:

- Produção e caracterização do lodo gerado na estação de tratamento;
- Presença de esgotos industriais no sistema, capaz de atribuir características especiais ao lodo, especialmente no que se refere ao conteúdo de metais pesados;
- Quantidade de lodo gerado na estação de tratamento;
- Características especiais que possam interferir com o sistema de disposição final.

As alternativas mais comuns envolvem a disposição final do lodo de esgoto são: disposição em aterro sanitário, incineração, *landfarming*, reuso industrial, produção de biodiesel, recuperação de áreas degradadas, o uso agrícola e florestal.

3.3.1 Disposição em aterros sanitários

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) - NBR 8419 define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

A disposição final do lodo em aterros sanitários é uma alternativa onde não há

reuso ou beneficiamento do resíduo, o material é disposto em células previamente impermeabilizadas seguidas por uma cobertura de terra (BATISTA, 2015). A degradação do lodo é anaeróbia, onde são gerados vários subprodutos, como o metano, que deve ser canalizado e queimado. Por não fazer beneficiamento, a estabilização do lodo e o teor de patógenos tem importância secundária para este método, todavia faz-se necessária a adequação entre as características do aterro e as do lodo.

De acordo com Ludovice e Fernandes (2014) existem duas modalidades de disposição que podem ser consideradas:

- *Aterros sanitários exclusivos*: nos quais só é disposto o lodo, sendo portando um aterro adequado às características do resíduo, sob o ponto de vista ambiental e de infraestrutura. Neste caso, geralmente opta-se pelo lodo com alto teor de sólidos (>30%) ou secos tecnicamente.
- *Codisposição com resíduos sólidos urbanos*: onde o lodo é misturado aos resíduos sólidos domiciliares. Neste caso, o aterro não é construído de forma adaptada à disposição do lodo. A mistura de lodo aos resíduos urbanos tende a acelerar o processo de biodegradação em função do teor de nitrogênio e do potencial de inoculação do lodo. O inconveniente desta alternativa é a redução da vida útil dos aterros. De modo geral, as prefeituras não aceitam lodos em seus aterros, por este ser um resíduo que pode dificultar a operação e certamente diminuir a vida útil do aterro, além de apresentar um risco a mais de contaminação da área.

O aterros podem ser uma alternativa para absorver demandas excedentes de outras formas de destino final, caracterizando-se por uma opção flexível no sentido de poder receber quantidades variáveis de lodo, operando de forma independente a fatores externos. Em contrapartida, o aterro apresenta uma limitação quanto a instalação, carecendo de grandes áreas, que devem ser adaptadas e de preferência próximas ao local de produção do resíduo, para reduzir os custos com o transporte.

Uma das características mais importantes para viabilizar a disposição do lodo em aterros é o teor de umidade. Em aterros onde há tráfego sobre os resíduos cobertos, segundo Miki, Além Sobrinho e Van Haandel (2006) o lodo deve apresentar no mínimo 30% de sólidos, sendo 40% considerada uma taxa boa. Altos teores de umidade tem impacto importante no transporte, volume ocupado e operação do aterro, causam crescimento excessivo da lixiviação, o que reduz a estabilidade das paredes, também colocam grandes incertezas nos cálculos, pois naturalmente há grande perda de água por percolação, gerando retração dos volumes aterrados (LUDUVICE; FERNANDES, 2014).

Os volumes de disposição do lodo devem ser calculados pela sua produção diária em base seca, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 — Exemplos de variação de volume requerido no aterro (fator demanda), em relação ao teor de sólidos do lodo

Teor de sólidos no lodo (%)	Fator demanda volumétrica de aterro por tonelada de matéria seca (m ³ /t seca)
15	6,93
20	5,43
25	4,3
40	2,75
90	1,1
Cinzas	0,32

Fonte:

Solomon et al. desestimulam a utilização desta alternativa de destinação, além dos problemas com maus odores, atração de insetos, pássaros e outros vetores, eles afirmam ser uma alternativa com baixo custo-efetividade.

3.3.2 Incineração

A incineração é uma forma de destinação final que assegura a maior redução no volume do lodo, ela implica na destruição da matéria orgânica através do processo de combustão, incluindo os organismos patogênicos. A cinza residual gerada pela queima dos resíduos apresenta volume inferior a 4% do volume do lodo desaguado alimentado ao incinerador, este equipamento apresenta capacidade de processamento superior a 1,0 t/h e são construídos para atender populações superiores a 500.000 habitantes (LUDUVICE; FERNANDES, 2014).

A combustão do lodo somente atinge condições autógenas quando a concentração de sólidos no lodo é acima de 35%, caso contrário, a combustão de lodos com concentração entre 20 a 30% somente ocorre através da utilização de combustível auxiliar, deste modo o poder calorífico do lodo é fundamental na redução no consumo de combustível, na Tabela 6 podemos ver esta característica de diferentes tipos de lodo.

Tabela 6 — Poder calorífico de diferentes tipos de lodo

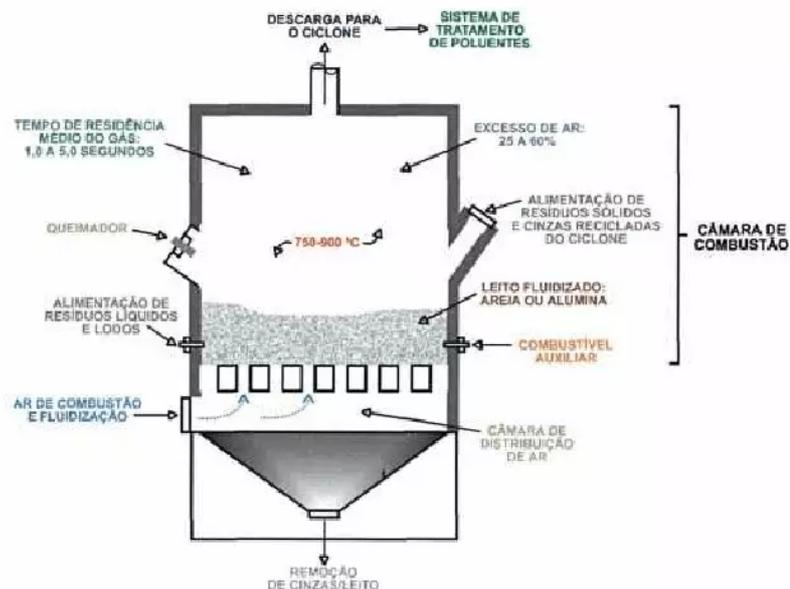
Tipo de lodo	Poder calorífico (kJ/kgST)
Lodo bruto primário	23.300 - 29.000
Lodo digerido anaeróbio	12.793
Lodo ativado	19.770 - 23.300

Fonte: Adaptado de Water Environment Federation (1996, p. 404)

Os tipos de incineradores atualmente em uso no tratamento do lodo de esgotos são o de múltiplas câmaras e o de leito fluidizado (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014). O incinerador de múltiplas câmaras é dividido em três zonas de combustão distintas, a inferior é conhecida como zona de resfriamento, a intermediária é onde ocorre a combustão propriamente dita e a superior é onde ocorre a remoção final da umidade.

O incinerador de leito fluidizado consiste em um vaso de combustão de câmara única com paredes refratárias, parcialmente cheio com partículas de areia, alumina, carbonato de cálcio ou outro material (CLAUREN, 2001). O leito fluidizado em contato com o lodo desaguado, retém as partículas orgânicas até a completa combustão das mesmas, apresenta menor custo de operação e melhor qualidade do ar liberado em comparação ao processo de câmaras múltiplas. Opera em condições autógenas a temperaturas superiores a 815°C (CHAKRABORTY et al., 2011). Na Figura 11 podemos ver o esquema de funcionamento de incinerador de leito fluidizado.

Figura 11 — Sistema incinerador de Leito fluidizado



Fonte: Guilherme (2000)

A incineração é um processo sofisticado e com alto custo operacional, por isso de maneira geral está restrito às grandes cidades, também torna-se uma opção de destino final viável quando outras opções de destinação tornam-se impraticáveis, por exemplo, quando há restrições ao reuso de lodo na agricultura ou limitações de espaços nos aterros sanitários. Segundo Batista (2015) as cinzas residuais também exigem disposição final adequada, principalmente pela elevada concentração de

metais pesados, a disposição indevida podem causar problemas de lixiviação.

A emissão de poluentes na atmosfera também é uma grande preocupação para viabilizar a utilização dos incineradores, gases como CO, SO₂, compostos orgânicos complexos e particulados são gerados (ANDREOLI, 1999), entretanto atualmente os sofisticados equipamentos são dotados de sistemas de filtro, que reduzem significativamente a emissão. Os gases liberados devem ser monitorados regularmente, garantindo que nenhuma substância tóxica escape para o meio ambiente.

3.3.3 *Landfarming*

No sistema conhecido como *landfarming* ou tratamento no solo não há uso benéfico dos nutrientes e matéria orgânica do lodo, o objetivo é a degradação do lodo através de microrganismos presentes no perfil do solo, que funciona como suporte para a atividade biológica, retenção de metais, local de exposição ao sol e reações de bioxidação (SILVA, 2004).

A disposição continuada de metais pesados e compostos químicos tóxicos inviabiliza áreas de *landfarming* para o uso futuro na agricultura e para impedir a contaminação de águas subterrâneas e superficiais, odores e atração de vetores, devem ser tomados vários cuidados ambientais. A aplicação em grande escala deve respeitar critérios ambientais rígidos, o que torna o emprego da tecnologia mais complexo (CETESB, 1999).

Como a área dedicada ao *landfarming* não tem finalidade agrícola, as taxas de aplicação de lodo neste sistema são bem superiores às taxas comumente aplicadas na agricultura. As doses de lodo, aplicadas ao solo, variam de 60 a 70 t/ha.ano em base seca, para áreas que não têm impermeabilização na camada inferior. Para aumentar a taxa de aplicação, o projeto de *landfarmig* deve prever a compactação e impermeabilização da camada de solo situada a 60-70cm da superfície, dotá-la de drenos, coletar integralmente os percolados e depois trata-los. Desta forma as restrições de contaminação do subsolo são eliminadas, o que permite aumentar as taxas de aplicação para a faixa de 300 a 600 t/ha.ano (FERREIRA, 1999) .

A NBR 13984:1997 – Tratamento no solo (*landfarming*) fixa as condições exigíveis para a aplicação do lodo no solo. A norma também diz as condições que devem ser preestabelecidas no projeto da unidade de tratamento, são elas a:

- a. taxa, frequência e método de aplicação do resíduo na zona de tratamento, bem como os critérios estabelecidos para sua definição;
- b. medidas de controle do pH do solo;
- c. manejo adequado do solo para otimizar parâmetros ambientais que cortam as reações microbiológicas e químicas (por exemplo: fertilização, removimento da terra);

- a. indicação do teor de umidade do resíduo a ser disposto na zona de tratamento;
- b. medidas de controle do teor de umidade na zona de tratamento;
- c. plano de operação e manutenção da unidade de tratamento, contendo registro de ocorrências;
- d. plano de inspeção e manutenção da unidade de tratamento, contendo registro das ocorrências;
- e. plano de monitoramento;
- f. plano de emergências.

A norma também estabelece as recomendações para a escolha da localização da unidade de tratamento, como:

- a. O impacto ambiental causado pela instalação da unidade deve ser o menor possível;
- b. O uso do local escolhido corresponda com a lei de zoneamento da região;
- c. Topografia com declividade inferior a 5%, visando melhor aplicação do resíduo e redução da velocidade de escoamento superficial;
- d. Distância mínima de 200 m de qualquer coleção hídrica;
- e. Distância mínima de 3 m entre a superfície do solo e o lençol freático.

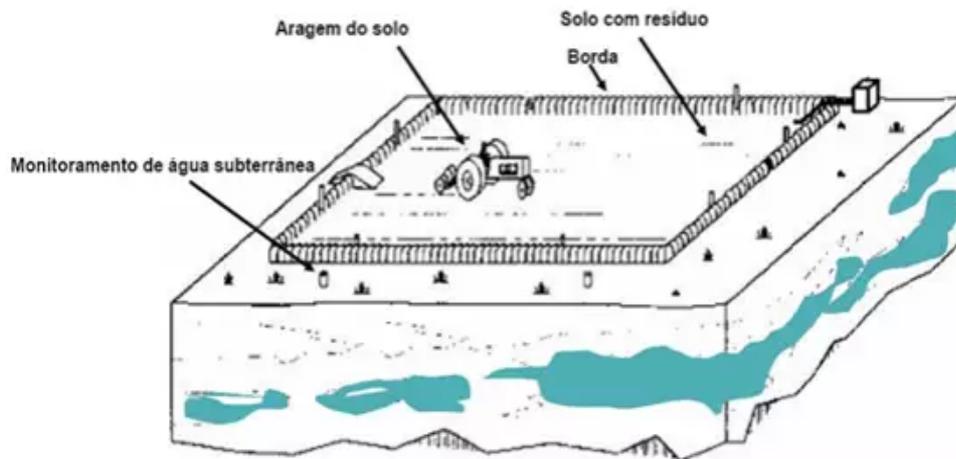
As Figuras 12 e 13 mostram em corte esquemático e vista superior uma célula de *landfarming*.

Figura 12 — Seção transversal esquemática de uma célula de *landfarming*



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997)

Figura 13 — Sistema de landfarming - Perspectiva superior



Fonte: Adaptado de

Na camada reativa, que faz parte da zona de tratamento, é a região onde acontece a degradação do lodo, esta camada deve ser periodicamente arada para facilitar a aeração (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014). Normalmente a aeração é realizada através de equipamentos agrícolas, estes abrem sulcos no solo para aplicação do lodo e em seguida cobrem o resíduo com um segundo arado. Esta camada deve ter profundidade máxima de 0,50 m a partir da superfície original. A zona de tratamento é a faixa onde além da degradação, ocorrem os processos de transformação e imobilização dos subprodutos gerados pela bioxidação do lodo.

Entre as vantagens apresentadas por esse tipo de disposição estão: a simplicidade de projeto e execução, efetividade na degradação dos compostos orgânicos com taxa de biodegradação lenta e custos operacionais competitivos. (USEPA, 1994). Entre as desvantagens podemos citar a necessidade de o lodo ter teor de sólidos de no mínimo 15% e estabilização prévia (BATISTA, 2015), a alta necessidade de área, geração de aerossóis e a própria necessidade de impermeabilização das camadas inferiores, que podem aumentar significativamente os custos de implantação. Vale lembrar também que as instalações possuem um período de vida útil, após o encerramento da célula devem ser avaliados os teores de contaminantes que ainda existem na camada reativa e assim definir o novo uso do terreno (LUPATINE et al., 2009).

3.3.4 Uso benéfico do lodo no solo

Os esforços para a redução da geração de resíduos, assim como seu reuso

ou reciclagem é uma tendência global (BATISTA, 2015), e é neste cenário que se encaixa o uso benéfico do lodo no solo. Sua composição possui elementos que lhe agregam valor, é um resíduo rico em matéria orgânica e em macro e micronutrientes, o que possibilita seu uso como matéria-prima ou insumo de processos agrícolas e florestais, pois pode ser aplicado como condicionador de solo e/ou fertilizante .

Sua disposição deve sempre fornecer segurança ambiental e sanitária, pois sua composição também apresenta diversos tipos de poluentes ao homem e ao meio ambiente, por isso esta destinação deve ser utilizada somente após o cumprimento de vários requisitos legais. Todavia de acordo com Fernandes et al. (2001), os lodos gerados por esgotos domésticos, de forma geral, não apresentam grandes restrições ao seu uso em relação a poluentes inorgânicos ou metais pesados. Nos itens a seguir serão detalhados os principais tipos de destinação final do lodo com uso benéfico no solo.

A Resolução nº 498 /2020 (CONAMA, 2020) define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Também veta o uso em solo de lodo de estação de tratamento de efluentes de estabelecimentos de serviços de saúde, de portos e aeroportos, lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento e lodo classificado como perigoso de acordo com as normas brasileiras vigentes. O art. 9 da resolução diz que:

Art. 9º O biossólido a ser destinado para uso, em solos, será classificado em Classe A ou Classe B, de acordo com os requisitos definidos neste artigo.

§ 1º Para que o biossólido seja classificado como Classe A, deverá atender ao limite máximo de 10^3 Escherichia coli por grama de sólidos totais (g^{-1} de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 1, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.

§ 2º Para que o biossólido seja classificado como Classe B, deverá atender ao limite máximo de dez elevada a sexta potência Escherichia coli por grama de sólidos totais (g^{-1} de ST) ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos na Tabela 2, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.

3.3.4.1 Uso agrícola do lodo

O uso do lodo em áreas agrícolas vem se demonstrando uma opção de baixo custo e com impacto ambiental positivo, a escolha deste tipo de destinação final vem crescendo em todo mundo (BATISTA, 2015), entretanto no Brasil ainda é uma opção pouco explorada. De acordo com Saito (2013) somente nos últimos anos que se desenvolveram pesquisas e experiências com a reciclagem de lodos na agricultura, seja com resíduos de características distintas, misturados com diferentes tipos de solos ou com algum material auxiliar.

Diferentes tipos de traço solo-lodo-material auxiliar, promovem melhorias físicas ao solo em que foram aplicados, principalmente na estruturação do mesmo. As dinâmicas de ciclagem dos nutrientes variam conforme a cultura agrícola em questão, diferenciando-se na quantidade de água, macronutrientes e micronutrientes necessários para o produto agrícola final, sendo que o tipo do solo também influencia nessa dinâmica. Todavia por norma a disposição agrícola é considerada uma solução definitiva para o trato final do lodo, em que transforma um resíduo em um relevante insumo agrícola.

Algumas pesquisas realizadas no país já apresentaram resultados satisfatórios da reciclagem do lodo como insumo agrícola, como a de Melo e Marques (2000) que expõem informações sobre os nutrientes fornecidos pelo lodo de esgoto para as culturas de sorgo, azevém e cana-de-açúcar. A cultura de milho também pode ser beneficiada, Silva, Resck e Sharma (2000) demonstraram que o lodo de esgoto gerado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal apresenta bom potencial para substituir o uso de fertilizantes minerais. Existem também pesquisas sobre o aproveitamento deste resíduo para culturas de aveia, trigo, arroz, feijão, pastagens, girassol, soja, café e pêssego (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

A reciclagem direta do lodo é vetada pelos critérios estabelecidos nas normas, para ser utilizado na agricultura deve-se realizar previamente as etapas de estabilização da matéria orgânica e de higienização para redução do nível de patógenos. Segundo Bettiol e Camargo (2006) para a caracterização do lodo para análise do uso na agricultura, os seguintes parâmetros são avaliados:

- Potencial Agronômico (Carbono orgânico, pH, umidade, Sólidos voláteis e totais, P, N, K, Na, Ca, Mg, S);
- Concentração de metais pesados (As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn);
- Concentração de material orgânico tóxico (Benzenos Clorados, Ésteres de ftalatos, Fenóis, Hidrocarbonetos aromáticos e Poluentes Orgânicos Persistentes - POP's);
- Presença de agentes patógenos (coliformes termotolerantes, ovos de helmintos, Salmonella sp e vírus entéricos);
- Estabilidade (SV/ST < 0,70).

Tabela 7 — Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (continua)

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Crômio	1000

Tabela 7 — Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (conclusão)

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida (mg/kg, base seca)
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: CONAMA (2006)

No Brasil, a Resolução CONAMA 375/2006 (CONAMA,2006) é a referência federal que regula as questões para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Esta legislação tem o objetivo de alcançar benefícios à agricultura evitando riscos à saúde pública e ao ambiente e não se aplica a lodos do tratamento de efluentes industriais (CORDEIRO, 2010) . Esta resolução classifica os lodos e seus derivados em dois tipos:

- Classe A – poderão se utilizados para quaisquer culturas, respeitadas algumas restrições;
- Classe B – Utilização restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação, respeitadas algumas restrições.

Além disso, a Resolução veta a utilização agrícola do lodo nos seguintes casos:

- I - Lodo de estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares;
- II - Lodo de estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos;
- III - Resíduos de gradeamento;
- IV - Resíduos de desarenador;
- V - Material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbicos;
- VI - Lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto;
- VII - Lodo de esgoto não estabilizado; e
- VIII - Lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes.

A legislação proíbe a utilização de qualquer uma das duas classes de lodo em culturas onde a parte comestível entre em contato com o solo, assim como tubérculos, raízes, pastagens e olerícolas, ao menos que a última aplicação tenha ocorrido a 24 meses para pastagens e 48 meses para os demais cultivos (BASTOS et al., 2009).

Sobre o uso agrícola Andreoli (1999) conclui:

O estabelecimento da sensibilidade destes parâmetros em cada região requer de resultados de pesquisas de longo prazo, não somente no aspecto

agronômico, mas também no aspecto sanitário e ambiental (patógenos e poluentes, como os metais pesados). Desta forma apresentamos parâmetros bastante restritivos para recomendação agrônômica, priorizando a segurança ambiental e sanitária em relação a definição de doses que apresentem melhores respostas na produtividade. Com o avanço dos estudos poderemos reduzir as restrições, definindo os parâmetros para dosagens menos conservadoras.

3.3.4.2 Recuperação de áreas degradadas

“Área degradada” para Skorupa et al. (2006) “é aquela que sofreu algum grau de perturbações em sua integridade, sejam elas de natureza física, química ou biológica”. A degradação está relacionada às atividades antrópicas, como o manejo inadequado da terra e da cobertura vegetal em atividades agropecuárias, o desenvolvimento urbano e atividades de mineração (MENDES, 2012). A degradação dos solos também compromete a integridade biológica do local, este efeito acontece através do surgimento de condições desfavoráveis à manutenção das comunidades de organismos da fauna e flora, bem como das inter-relações entre eles (perda de biodiversidade).

Recuperação, segundo Michaeles (2021) é definido como: ato ou efeito de recuperar(-se); recobrimento, reconquista da saúde ou volta à vida normal, ou seja, é a reversão de uma condição degradada para uma condição não-degradada (MAJOER, 1989), independente de seu estado original e de sua destinação futura (RODRIGUES; GANDOLFI, 2001). Então a recuperação de uma área degradada tem o objetivo de recuperar a integridade física, química e biológica (estrutura) e, ao mesmo tempo, recuperar a sua capacidade produtiva (função), seja na produção de bens de consumo e matérias-primas, ou na prestação de serviços ambientais.

A recuperação de áreas degradadas por meio da utilização do lodo de esgoto tem demonstrado resultados bastante promissores. A alta deficiência de matéria orgânica, nutrientes e atividade biológica do solo são as principais características dessas regiões. A composição química do lodo, com a capacidade de melhorar as condições físicas do solo fazem do lodo um resíduo com grande potencial de utilização para a recuperação de áreas com solos degradados (SAITO, 2013). A incorporação desse resíduo pode alterar os seguintes atributos do solo:

- Densidade e porosidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Estabilidade dos agregados;
- Infiltração da água e condutividade hidráulica;
- Capacidade térmica;
- Redução linear da massa específica do solo em função do aumento do conteúdo de matéria orgânica.

As taxas de aplicação neste tipo de destinação são bastantes elevadas (TAMANINI, 2004) pode alcançar até 450 toneladas por hectare (MALINA, 1993). A quantidade a ser aplicada dependerá da composição química do lodo, baseando-se no valor de fertilização (N, P, K), considerando-se as concentrações de metais pesados presentes, além da presença de patógenos.

Bezerra et al. (2006) realizou um trabalho onde foi verificada a viabilidade para disposição final de lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Etar-Apoio) para o processo de revegetação de áreas degradadas localizadas no próprio aeroporto. O estudo apresentou resultados satisfatórios. A adição do lodo de esgoto ao solo aumentou consideravelmente os teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e cálcio, e em menor extensão os teores de magnésio e potássio, com pouca alteração no pH do solo. A adição do lodo de esgoto influenciou positivamente o desenvolvimento de *Mimosa caesalpiniiifolia* (Sabiá) e *Mimosa bimucronata* (Maricá), não se observando efeito depressivo à resposta das mudas em relação ao material, causado por qualquer dose

Em outro trabalho, realizado por Boeira et al. (2003), um experimento foi instalado em uma área degradada de Jaguariuna, SP, foram avaliados três tratamentos: duas doses de lodo de esgoto (1N e 2N), a adubação mineral (NPK) em dois subtratamentos com espécies pioneiras, *Guazuma ulmifolia* Lam (mutamba) e *Croton floribundus* Spreng (croton). Na dose N1 e N2 foram aplicados 6 Mg/ha e 12Mg/ha em base seca respectivamente. A pesquisa concluiu que o teor de fósforo disponível no solo, na época de plantio das mudas, foi similar na adubação mineral e na dose mais elevada de lodo de esgoto, observou-se também que o desenvolvimento inicial das espécies plantadas foi similar em solo tratado com lodo e com adubação mineral. Na Figura 14 ilustra-se aplicação de lodo em área degradada.

Figura 14 — Aplicação de lodo em área degradada



Fonte: Agência Brasil (2015)

Mesmo que a utilização do lodo como condicionador de solos degradados apresente várias vantagens, ainda é necessário o desenvolvimento de pesquisas a respeito do tema, com o propósito de orientar sua aplicabilidade de forma segura. É necessário um aprofundamento das pesquisas nas reações químicas entre solo e lodo, assim como nos riscos de contaminação das águas superficiais e subterrâneas (BATISTA, 2015).

Apesar das vantagens de utilização do lodo como condicionador de solos degradados, há muito a se desenvolver nas pesquisas a esse respeito, de modo a orientar sua aplicabilidade de forma segura e benefícios de suas propriedades físico-químicas do solo, além dos impactos. Necessita-se de pesquisas que aprofundem nas reações químicas entre lodo e solo, assim como os perigos de sua lixiviação e contaminação das águas superficiais e subterrâneas, e a ameaça de lixiviação (BERTON, 2000).

3.3.4.3 Uso em do lodo em plantações florestais

A aplicação do lodo de esgoto tratado em plantações florestais é uma alternativa viável de uso do biossólido, principalmente porque se destina à produção de madeira, não afetando a cadeia alimentar humana (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006). Essas plantações contribuem para o processo de fitorremediação, pois funcionam como um filtro biológico, pois captura, acumula e armazena elementos poluentes na biomassa. Diferencia-se da aplicação agrícola, pois aceita concentrações mais elevadas de metais pesados, desde que não prejudique a atividade fisiológica.

A aplicação de lodo em plantações florestais deve ser realizada em separado para uso agrícola, pois os critérios para uso na agricultura são muito mais rigorosos (TSUTIYA, 2001b). Além de critérios menos severos, o uso em sistemas florestais apresenta muitas vantagens em relação à sistemas agrícolas, Hart *et al* (1988) e Batista (2015) citam:

- Os riscos de contaminação humana são muito menores, pois os compostos não entram na cadeia alimentar, pelo fato dos produtos das culturas florestais não serem comestíveis;
- Os ciclos das culturas florestais são mais longos e a acumulação da biomassa contribui para a remoção de possíveis elementos perigosos do solo;
- Menor risco de contato humano após a aplicação de lodo;
- O ciclo longo das culturas florestais permite intervalos mais longos e favorecem a dinâmica entre as aplicações;
- Melhor aproveitamento dos nutrientes, visto que os solos florestais são, em geral, muito pobres e o sistema radicular perene aumenta a eficiência de absorção dos elementos.

Comparado a adubação natural, o lodo libera mais lentamente os nutrientes, o que para culturas de ciclo longo plantadas sobre solos arenoso e de baixa fertilidade otimiza a absorção e minimiza as perdas por lixiviação. Lira *et al.* (2008) avaliaram como o lodo de esgoto altera os estoques de Carbono e Nitrogênio em plantações de eucalipto, as pesquisas demonstraram que o biossólido conseguiu oferecer N as culturas tanto quanto a adubação mineral, atestando que este tipo de resíduo pode ser aplicado para suprir este nutriente em plantações florestais desse tipo de cultura (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000).

No Brasil, uma série de pesquisas realizadas pelo grupo da ESALQ/USP sobre o efeito da utilização de lodo de esgoto na produção de madeira de eucalipto tiveram início no ano de 1999. Muitos resultados positivos foram obtidos e os pesquisadores chegaram ao consenso de que o lodo de esgoto aplicado no solo promove o aumento dos índices produtivos em culturas de eucalipto.

Tem-se verificado que a utilização de 10 t ha^{-1} de lodo de esgoto é a mais recomendada devido aos satisfatórios índices obtidos, Melo *et al.* (2001) observaram que esta taxa de aplicação, sem suplementação de potássio, elevou o teor desse nutriente de 0,8 (testemunha) para $1,1 \text{ mmolc dm}^{-3}$ de solo, faixa considerada aquedada para o crescimento do eucalipto. Silva (2006), também constatou que esta dose de aplicação é a mais adequada, em seu estudo comparou a influência do lodo de esgoto seco e úmido no desenvolvimento das árvores de *Eucalyptus grandis*, verificou estes tratamentos apresentaram crescimento em altura significativamente maior comparado ao tratamento sem suplementação e similar ao com adubação

natural.

Sobre o uso do lodo em plantações florestais, Nascentes (2019) conclui:

Apesar dos promissores resultados sobre os riscos de contaminação por metais pesados, ainda é necessário maiores estudos para comprovar que esse bio sólido pode ser utilizado, pois o efeito destes contaminantes no solo e nas plantas a médio e longo prazo ainda são pouco conhecidos. Em função disso, torna-se essencial determinar a concentração desses compostos antes da sua aplicação ao solo, sendo seu uso somente recomendado quando em conformidade com a resolução do CONAMA (2006).

3.3.4.4 Uso do lodo na produção de substrato vegetal

De acordo com Andreoli (2006) substrato “é uma combinação de componentes utilizada para a produção de mudas, é ele que fornece as condições químicas e físicas favoráveis à germinação das sementes e ao seu desenvolvimento”. Para Carneiro (1995) “substrato é o meio em que as raízes se proliferam, para fornecer suporte estrutural à parte aérea das mudas e também as necessárias quantidades de água, oxigênio e nutrientes”.

Em geral, a composição do substrato é uma mistura de materiais formada para se adequar as necessidades da espécie cultivada em questão, fatores como densidade, equilíbrio nutricional, retenção de água, disponibilidade de material na região, valor econômico dos itens e condições locais são preponderantes para a definição da proporção. A mistura serve para ajustar as características químicas e físicas do substrato final às necessidades das espécies vegetais. Para Andreoli (2006), os principais materiais para a mistura são:

Terras de subsolo, misturas de materiais orgânicos, como esterco, casca de arroz, compostos e minerais como a vermiculita e fertilizantes químicos. Outros materiais que podem ser utilizados são areia, turfa, serragem, lodo de ETA, casca de árvores decompostas, moinha de carvão, lodo de esgoto, húmus, fibra de coco, casca de Pinus, poliestireno expandido, espuma fenólica, vermicomposto, dentre outros. No mercado, existe grande quantidade de substratos prontos como compostos orgânicos, espuma fenólica, húmus e preparados comerciais.

De acordo com Fermino e Kämpf (2012), o conhecimento prévio das propriedades físicas e químicas é essencial para o sucesso na constituição de um substrato, saber como as sementes e as mudas iram interagir também é fundamental.

Para uso de lodo de esgoto, os autores recomendam que esse resíduo seja previamente higienizado e analisado quimicamente de modo a evitar a contaminação do substrato. Níveis de contaminação com elementos como metais

pesados, patógenos e sementes de plantas invasoras são fatores significativos para a qualidade do substrato. Segundo Andreoli (2004), um substrato adequado para a produção de mudas deve apresentar:

- Alta capacidade de retenção de água;
- Porosidade suficiente para permitir aeração adequada, inclusive sob estado de saturação hídrica;
- Estabilidade de estrutura ao longo do período de desenvolvimento das plantas;
- Alta capacidade de retenção de nutrientes (CTC);
- Boa capacidade de tamponamento contra alterações de pH;
- Ausência de pragas e agentes fitopatogênicos;
- Ausência de substância inibidoras de crescimento ou prejudiciais às plantas;
- Possuir o mesmo comportamento a um dado manejo;
- Permitir armazenamento;
- Boa capacidade de re-hidratação após secagem;
- Previsível dinâmica dos nutrientes; e
- Pouca atividade biológica.

A utilização do lodo de esgoto na composição de substratos vegetais oferece uma efetiva economia na adubação suplementar, Trigueiro e Guerrini (2003), em pesquisa utilizando lodo de esgoto para a produção de mudas de eucalipto, obtiveram uma economia de fertilizante na ordem de 64%, outro benefício é o ambiental, pois se reutiliza um resíduo sólido descartado sem qualquer tipo de beneficiamento. O processo de preparação do substrato pode ser dividido nas seguintes etapas (ANDREOLI, 2004):

a. Elaboração do substrato: moagem e peneiramento dos materiais base, com posterior adição dos demais materiais no misturador;

b. Realização da mistura: a partir dos materiais mais facilmente disponíveis na região e de menor custo, os materiais são misturados em uma dosagem pré-determinada para obter uma densidade adequada e uma boa homogeneização;

c. Esterilização do substrato: após pronto o substrato deve ser esterilizado para a inativação de sementes de plantas indesejáveis e eliminar possíveis patógenos, geralmente este processo é realizado através de solarização, compostagem, aquecimento em forno, revolvimento, aplicação de água quente ou utilização de produtos químicos;

d. Ajuste físico: ajuste das características necessárias para o perfeito desenvolvimento das mudas, como a porosidade, densidade e retenção de água.

e. Complementação nutricional: análise química para determinação de sua fertilidade, ou seja, quais e quanto de nutrientes estão prontamente disponíveis e quais necessitam de complementação;

f. Acondicionamento nos recipientes: o substrato é acondicionado nos recipientes que receberão as mudas;

g. Manejo inicial complementar: dependendo dos materiais utilizados, outras

avaliações podem ser necessárias, como o de metais pesados, condutividade elétrica e sanidade.

Monteiro et al (2019) avaliaram a aplicação de substratos vegetais formulados a partir de diferentes proporções de lodo de esgoto solarizado, na produção de acácia-negra (*Acacia mearnsii*), utilizaram lodo com teor de umidade inferior a 20% combinado com cinza de casca de arroz e vermiculita em diferentes proporções (20:40:40, 30:35:35, 40:30:30, 50:25:25 e 60:20:20) e dois substratos comerciais (Beifort® S10 B e Mec Plant®). A inclusão do lodo solarizado proporcionou substratos que resultaram em eficiência agrônômica similar ou superior aos substratos comerciais avaliados para a cultura da acácia negra, O substrato com 20% de LETE solarizado, 40% vermiculita e 40% cinza de casca de arroz apresentou a melhor condição físico-hídrica para o desenvolvimento de mudas de acácia-negra.

3.3.5 Uso benéfico do lodo na construção civil

A busca pela reciclagem de resíduos na construção civil é uma prática estudada a algumas décadas, para Inguza (2006) podemos definir a reciclagem de resíduos como:

O conjunto de atividades que tornam possível o reaproveitamento ou utilização dos resíduos sólidos provenientes da própria construção civil ou de outras atividades, até então considerados inúteis e problemáticas, a reciclagem pode ser considerada como prática ambientalmente correta, diminuindo o consumo de recursos naturais, seja na forma de matérias-primas ou de energia, transformando resíduos em recursos e reduzindo, assim, os custos e danos ambientais decorrentes de práticas inadequadas de disposição final.

A incorporação do lodo na linha de produção de algum material diminui os gastos com a matéria-prima que é geralmente utilizada, também apresenta vantagens ao meio ambiente, pois dá destinação ao resíduo e diminui qualquer risco de contaminação de recursos naturais, além de proporcionar à empresa prestadora desse serviço ótima imagem perante a sociedade. Nesse sentido, as indústrias de produtos cerâmicos e produção de concreto apresentam um grande potencial para empregar o lodo de esgoto, pois suas composições podem apresentar valores de propriedades tecnológicas em faixas menos rigorosas (BATISTA, 2015).

A incorporação do lodo de esgotos na fabricação de produtos cerâmicos, como tijolos, lajotas e telhas, tem-se mostrado uma alternativa viável de destinação adequada. O reuso do lodo acontece basicamente pela sua adição ao processo de preparação da massa cerâmica, auxiliando na correção de umidade. (ANDREOLI et

al., 2006). WENG, LIN e CHIANG (2003) fizeram um estudo sobre a incorporação de lodo seco na massa para fabricação de tijolos, eles concluíram que a proporção de lodo e a temperatura de queima são os fatores chaves para determinar a qualidade do tijolo. O estudo constatou que incorporação de 10% de lodo com 24% de umidade, queimados numa faixa de temperatura entre 880°C e 960°C são uma faixa otimizada para a produção de tijolos de boa qualidade.

Fontes (2008) recorreu a adição de cinza de lodo de esgoto, como aditivo mineral para produção de concreto de alto desempenho, o lodo de esgoto foi utilizado após processo de queima controlada à temperatura de 550°C. Com o propósito de conferir à cinza de lodo de esgoto maior reatividade pozolânica, misturou-se em proporções iguais o lodo e a metacaulinita. Foram produzidos concretos de alto desempenho utilizando teores de substituição de 5 e 10%, em massa, de cimento Portland por aditivo mineral, os testes demonstraram que a utilização deste material proporcionou melhorias em todas as propriedades dos concretos.

Silva et al (2014) fez um estudo sobre a utilização do lodo incinerado gerado pela ETE de Teófilo Otoni (MG) na substituição parcial de constituintes do concreto, com a cinza do lodo incinerado, substituíram-se as porcentagens da areia, e do agregado miúdo. Foram confeccionados cinco tipos de concreto, sendo eles: a testemunha, e os com substituição de 5%, 10%, 15% e 20% da areia por cinzas descendentes do lodo gerado pela ETE. Conforme o teste de compressão axial os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que a menor resistência averiguada após 14 dias de cura corresponde ao corpo de prova com 20% de substituição, representando 97,85% da resistência característica do traço do concreto.

A utilização de resíduos tem se mostrado como uma atividade tecnicamente promissora na absorção de novos materiais no setor da construção civil. No entanto, na sustentabilidade econômica deve estar intimamente associada ao valor de mercado dos produtos gerados a partir de resíduos, dos custos do processo de reciclagem, dos custos da disposição final e dos potenciais impactos ambientais decorrentes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a pesquisa em questão, adotou-se a natureza quali-quantitativa conforme os objetivos estabelecidos, ou seja, avaliar os critérios para contribuir com a seleção e alternativas de destinação final do lodo de esgoto sanitário provenientes de ETE localizada em condomínio na cidade de Manaus, foram realizadas diversas etapas e utilizados procedimento e instrumentos de pesquisa.

Inicialmente e, paralelamente a todas as outras etapas, foi realizado aprofundado levantamento teórico para a pesquisa que se apresenta sob caráter exploratório. O estudo bibliográfico concentrou-se nas contribuições teóricas de vários autores (inter)nacionais que realizaram publicações, monografias, dissertações, periódicos, revistas técnicas e teses sobre o tema de trabalho. Outro procedimento para a coleta de dados foi a realização de estudo aplicado em uma ETE localizada em condomínio residencial na cidade de Manaus.

O estudo foi realizado entre os meses de março e novembro de 2021 e foi dividido em 6 (seis) etapas principais, além do levantamento teórico realizou-se o cálculo da estimativa de produção de lodo, a definição dos critérios, a definição dos pesos de apoio à decisão, a proposição de alternativas tecnológicas em consonância com a realidade da ETE de estudo, localizada na cidade de Manaus e, por fim, foi construída matriz de resultados consolidados (Figura 15).

Figura 15 — Fluxograma das etapas de realização do trabalho



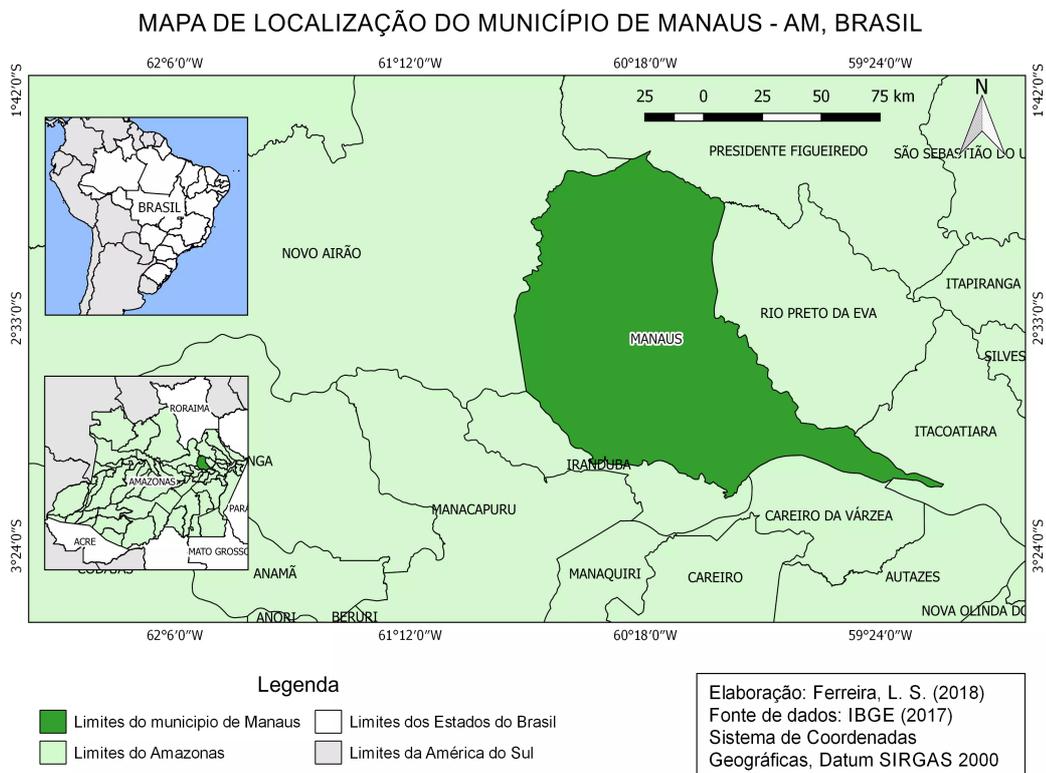
Fonte: O autor (2021)

4.1 Contextualização da cidade de Manaus

Manaus está situada na região Norte do Brasil (Figura 16), em uma microrregião denominada Médio Amazonas. A 60° de longitude oeste, 3°08" de latitude sul, distante 1.700 km em linha reta do litoral, com altitude de 92.9 m (HEYER, 1997). Apresenta características de clima equatorial úmido, com temperaturas médias anuais sempre acima de 22°C, chuvas abundantes - 2.500 mm, intensa radiação, elevada umidade do ar e baixas velocidades de ventos (NIMER,1979). É a sétima maior capital do Brasil em população, com um total estimado de 2.255.903 de habitantes (IBGE, 2021). Possui histórico de crescimento urbano desordenado, sendo este um dos principais motivos para a baixa disponibilidade de serviços básicos para a população, devido a sua deficiente infraestrutura.

Segundo Nogueira, Sanson e Pessoa (2007) a ausência de planejamento urbano sistemático e a falta de controle relacionado ao crescimento ocasionaram sérios problemas ambientais à cidade de Manaus, e atualmente a grande concentração populacional das zonas norte e leste são os responsáveis pelo agravamento dos problemas relacionados a deficiência de saneamento básico.

Figura 16 — Localização do Município de Manaus

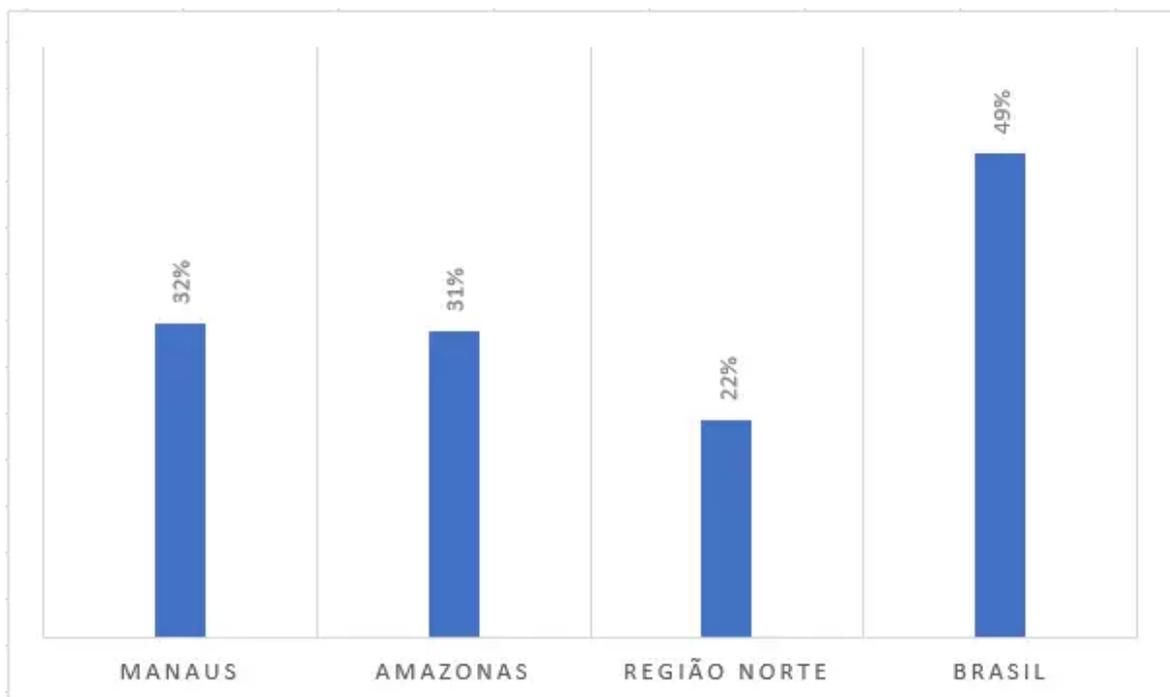


Fonte: Ferreira, L.S. (2018)

De acordo com o 25º diagnóstico dos serviços de água e esgotos de 2019 (BRASIL, 2020), a cidade apresenta apenas 20% de Índice de atendimento urbano de esgoto, índice que indica a parcela da população urbana que foi efetivamente atendida por rede coletora de esgoto (com ou sem tratamento) em relação à população urbana residente. Em relação ao volume de esgoto coletado por rede, o diagnóstico indica que 100% dele foi submetido a tratamento, entretanto este indicador pode causar uma ilusão se mal interpretado, pois não reflete a porcentagem real do esgoto tratado da cidade.

O indicador de esgoto tratado referido à água consumida nos traz um panorama mais completo da situação da cidade, pois expressa o percentual do volume de esgoto submetido a tratamento em relação ao volume de esgoto gerado. Sob este olhar o município apresenta apenas 31,78% de esgoto tratado, abaixo da média nacional de 49,09%, conforme se observa na Figura 17.

Figura 17 — Comparativo dos Índices de esgoto tratado referido à água consumida



Fonte: Adaptado de SNIS (2019)

O sistema de esgotamento sanitário é operado pela concessionária Águas de Manaus, o qual possui a extensão aproximada de 536 quilômetros de redes coletoras, interceptores e coletores tronco de esgoto na cidade. A concessionária opera com 60 (sessenta) estações de tratamento de esgoto e 51 estações elevatórias, subdividindo-se em dois sistemas, o integrado e isolados (ÁGUAS DE

MANAUS, 2021).

O sistema integrado abrange o centro da cidade e partes dos bairros Educandos, Morro da Liberdade, Santa Luzia, Glória e São Raimundo, esses dois últimos foram integrados ao sistema em 2020, após o fim das obras do PROSAMIM III. A previsão da concessionária é aumentar o Índice de atendimento urbano de esgoto para 80% da capital até o fim de 2030, ampliando em cinco vezes sua capacidade atual de levantamento (GUEDES, 2019).

Em Manaus, a Lei Municipal N.º 1.192/2007, estabelece no Art. 7º a obrigatoriedade de instalação de sistema de tratamento de esgoto nos empreendimentos potencialmente poluidores, privados ou públicos, desprovidos de sistema público de esgoto e, cujo número de usuários seja superior a 40 pessoas por dia, localizados na área urbana e de transição. O tratamento deve possuir as etapas de pré-tratamento, tratamento primário, secundário e desinfecção.

4.2 Estudo de caso - ETE condominial

O sistema de tratamento de efluentes estudado foi um empreendimento residencial localizado na zona centro-sul de Manaus. O empreendimento possui 5 blocos edificadas, totalizando 360 apartamentos, cada apartamento possui entre 03 e 04 dormitórios, com taxa ocupacional média de 05 pessoas por apartamento, o que representa uma população total de 1800 pessoas. Para o dimensionamento do projeto, considerou-se contribuição de esgoto de 200 litros/pessoa.dia, levando a uma vazão de projeto de 360 m³/dia ou 360.000 litros/dia.

Vale destacar que as informações apresentadas sobre a ETE de estudo foram disponibilizadas pela gestão do condomínio devidamente formalizada, por meio de documento de autorização, pelas partes envolvidas. Neste sentido, foi concedido cópia do Memorial descritivo do projeto técnico e das orientações operacionais e de manutenção da ETE instalada.

4.2.1 Caracterização da ETE

O tratamento do esgoto sanitário gerado no empreendimento é realizado por processos combinados de filtro anaeróbio seguido de reator aeróbio aerado mecanicamente com leito fixo de bactérias, decantador secundário e desinfecção por cloro (Figura 18).

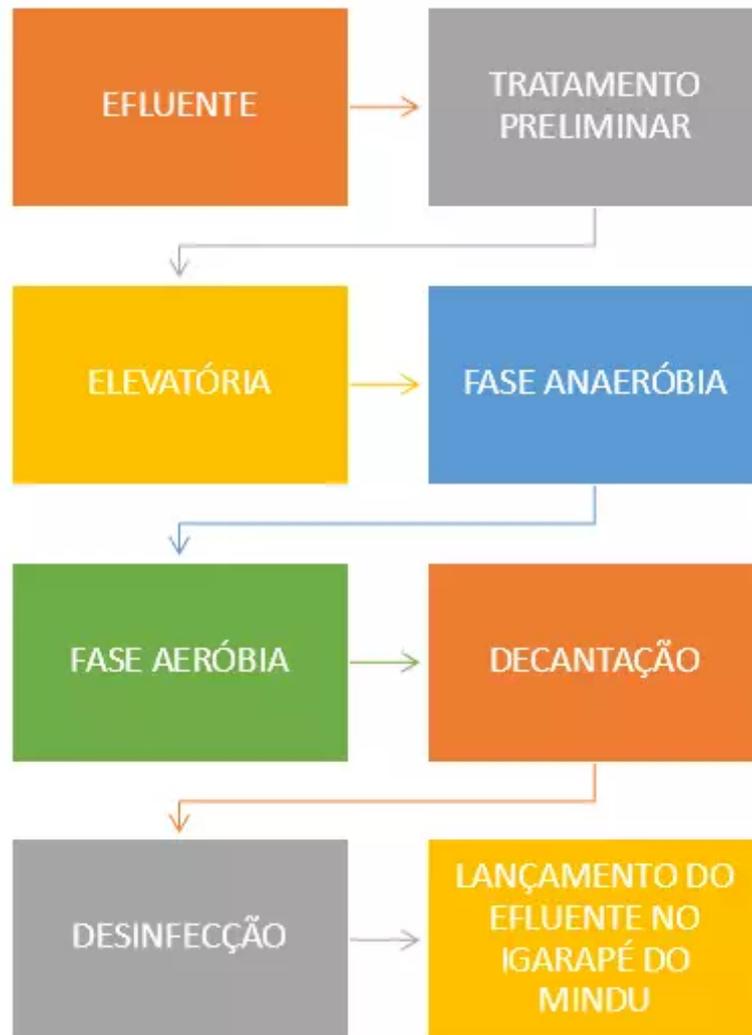
Figura 18 — Imagem da ETE localizada em condomínio de Manaus



Fonte: O autor (2021)

O sistema é composto por um tratamento preliminar com elevatória de esgoto, com gradeamento em tela inox, tratamento primário através de filtro anaeróbio, tratamento secundário com filtro aeróbio por aeração forçada, filtro de decantação e por fim um tratamento químico de tanque de contato de desinfecção por pastilhas de hipoclorito de cálcio (Figura 19). O lodo de esgoto fica depositado nos tanques de PRFV das fases anaeróbias e aeróbias .

Figura 19 — Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto



Fonte: O autor (2021)

4.2.1.1 Tratamento preliminar - Pré-tratamento

Constituído por processos físicos, nesta etapa ocorre a remoção dos materiais em suspensão e retenção de areia, e tem como principal finalidade a proteção dos dispositivos de transporte e de tratamento de efluentes. A etapa de tratamento preliminar da ETE em estudo é constituída por um tanque construído em alvenaria estrutural em formato retangular com o volume total de 16.800 litros. O gradeamento é composto por uma chapa moeda de aço inoxidável, com dimensões dos furos de Ø 30 mm e posicionada em ângulo de 90°, fazendo a separação dos sólidos grosseiros e materiais plásticos.

4.2.1.2 Elevatória de Efluentes

Mediante duas bombas submersíveis localizadas ao final do tanque de pré-tratamento, os efluentes provenientes da rede de esgoto são elevados até a próxima etapa do tratamento de esgoto. O sistema de bombeamento tem o auxílio de boias elétricas com sensor de mercúrio, programadas para interromper o bombeamento caso seja detectada a presença deste metal. Instaladas em níveis diferenciados e comandadas por chaves contadoras e disjuntor instalados em painel de comando a prova d'água.

4.2.1.3 Tratamento Primário - Fase Anaeróbia

Esta etapa ocorre em dois tanques fabricados em PRFV (polímero reforçado em fibra de vidro), estes possuem formato cilíndrico, cada um com capacidade de tratamento de 2.830 litros de efluentes. O primeiro tanque recebe o efluente bombeado do tanque preliminar, e em sequência o segundo recebe do primeiro, já com substâncias instáveis parcialmente estabilizadas e com redução dos microrganismos presentes no efluente. O tempo de detenção hidráulica desta etapa é de 12 horas.

4.2.1.4 Tratamento Secundário - Fase Aeróbia

O tratamento na fase aeróbia ocorre com a aeração forçada de ar de fluxo descendente. Esta etapa é composta por dois tanques de PRFV, com capacidade para tratamento de 24.030 litros de efluentes domiciliares. O primeiro tanque é de fluxo vertical, com capacidade de 14,14 m³, já o segundo é de fluxo vertical, com 9,90 m³. O tratamento é efetivado por microrganismos aeróbios que se desenvolveram em função do suprimento de oxigênio fornecido através de sistema de aeração prolongada ou forçada por aerador tipo hélice. Para uma otimização do processo bacteriológico, a velocidade do fluxo de ar é mantida constante e os sólidos são mantidos em suspensão, através de trajetória horizontal do fluxo de ar.

Segundo o projeto da ETE (2020).

O aerador funciona a partir da movimentação de uma hélice, gerando um vácuo parcial no interior do eixo, criando um processo de sucção de ar externo, o qual é dissolvido na água pelo fluxo da hélice. Ocorre um processo de difusão do ar em bolhas no fluxo laminar horizontal, gerado pela rotação da hélice, assegurando assim uma excelente transferência de oxigênio.

4.2.1.5 Decantação

Após a etapa de tratamento aeróbia, os efluentes são transportados para três tanques cilíndricos de PRFV, com capacidade de tratamento de 14,14 m² cada para sofrerem o processo de decantação, ele tem por finalidade a separação de sólidos constituídos basicamente de biomassa arrastada da fase anaeróbia, assumindo-se um fluxo contínuo de efluente.

4.2.1.6 Desinfecção por Cloro

Etapa final antes do descarte do efluente, ela ocorre em um tanque de contato, construído em formato de caixa de alvenaria estrutural com volume 1,12 m³. Este tanque utiliza a desinfecção por hipoclorito de cálcio, obtidos através da reposição manual de pastilhas de cloro. A finalidade desta etapa é de conseguir remoções adicionais de poluentes em águas residuais, antes de sua descarga no corpo receptor, possui retenção aproximada de 30 minutos e concentração de 10 mg de cloro ativo por litro de efluente tratado. Após este processo o efluente é lançado no afluente do Igarapé do Mindu, localizado nas proximidades do empreendimento residencial.

4.2.2 Destinação do Lodo da ETE

Conforme o manual de operação da estação, a limpeza é realizada em intervalos de 6 (seis) meses, com o auxílio de caminhão limpa fossa, credenciado e autorizado pela SEMMAS (Secretaria Municipal do Meio Ambiente e Sustentabilidade). Como não há etapas para o tratamento do lodo, o mesmo é retirado por um empresa licenciada para tal atividade e encaminhado para uma central de tratamento, onde o lodo é desidratado, após essa etapa o lodo é encaminhado para o aterro controlado da cidade.

A remoção do lodo do filtro anaeróbio é realizada por meio da tampa de inspeção localizada na parte superior externa ao tanque contato, a limpeza é por sucção. Já o lodo da fase aeróbia, é removido do fundo do leito cilíndrico desta fase, para que não ocorra obstrução da bomba instalada, este procedimento requer a abertura da tampa de inspeção acima do tanque, devem ser removidos apenas 30% do lodo excedido, para que seja mantida uma população mínima de microrganismos para que o processo de tratamento, não seja comprometido.

4.3 Estimativa da geração de lodo na ETE

Para o cálculo da quantidade de lodo gerada na estação de tratamento de esgoto estudada foi adotada uma abordagem simplificada. O cálculo expressará a produção de lodo em termos *per capita* em termos da demanda química de oxigênio (DQO), apresentando a massa de sólidos em suspensão removidos por unidade de DQO aplicada (FERNANDES et al., 2014).

Foram assumidos os valores típicos de teor de sólidos, massa de lodo e volume de lodo encontrados em literatura sobre o tema conforme o Quadro 5, desta forma o volume de lodo produzido foi com base na carga per capita diária e a concentração de sólidos seco.

Quadro 5 — Dados para a estimativa da quantidade de lodo gerada

Dados para a estimativa	Valores adotados
Produção de lodo - fase anaeróbia	8 gSS/hab.dia
Produção de lodo - fase aeróbia	30 gSS/hab.dia
Concentração de sólidos	8%
Período de remoção do lodo	a cada 6 meses

Fonte: O autor (2021)

Para a estimativa de lodo foi considerado o lodo removido ainda na fase líquida, visto que não existe etapa de desidratação no tratamento existente. O cálculo foi realizado para o período de 6 meses, pois de acordo com o memorial descritivo do projeto, este é o período de limpeza dos tanques da estação. As características e quantidades de lodo produzidas foram definidas de acordo com o que têm-se na literatura sobre o tema. Considerou-se que cada habitante contribui em torno de 100g DQO por dia (0,1 kgDQO/hab.d) (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

4.4 Definição dos critérios e pesos para a avaliação

Para a definição dos critérios adotados de avaliação de alternativas para o tratamento e destino final do lodo de esgoto da ETE em estudo foram adotados os critérios que envolvem os aspectos técnicos, econômicos, ambientais, legais e sociais-urbanos. Como a estação de tratamento em questão está implantada e não possui processamento e destinação final como etapa integrada ao projeto, foi feita avaliação das adequações necessárias para permitir o tratamento do lodo, como área disponível, possibilidade de utilização das estruturas já existentes e

necessidades de novas construções. Na Figura 20 apresenta-se o fluxograma das Inter-relações entre as características do efluente líquido, tecnologia de tratamento do esgoto, processamento do lodo e alternativas de uso e destino final.

Figura 20 — Inter-relações entre as características do efluente líquido, tecnologia de tratamento do esgoto, processamento do lodo e alternativas de uso e destino final



Fonte: Adaptado de Fernandes et al. (2014, p. 301)

Com base nas particularidades do fluxo de destinação do lodo de esgoto conforme apresenta por Fernandes et al (2014) adaptado na Figura 20 o presente trabalho analisou critérios sob o enfoque ambiental, legal, econômico, técnico e social-urbano, buscando alinhar com a perspectiva da potencialidade de alternativas de uso do lodo de esgoto, bem como no contexto da sustentabilidade.

Os critérios de avaliação foram classificados em tangíveis ou intangíveis, foram avaliados como tangíveis aqueles que possuem suas variáveis passíveis de quantificação, neste caso se enquadram os critérios econômicos e legais. Já para os critérios intangíveis foram necessários o juízo de valor para análise, sendo assim foi quantificado o desempenho da alternativa adotando critério de referência, onde as alternativas foram comparadas entre si. Nesse caso se enquadraram os critérios ambiental, técnico e social-urbano, de acordo com o Quadro 6.

Quadro 6 — Lista de Critérios (continua)

Critérios	Classificação
Ambiental	Intangível
Econômico	Tangível

Quadro 6 — Lista de Critérios (conclusão)

Critérios	Classificação
Legal	Tangível
Sócio-urbano	Intangível
Técnico	Intangível

Fonte: O autor (2021)

4.5 Construção da matriz de resultados

A matriz de resultados foi elaborada com as alternativas de destinação final levantadas durante o trabalho e foram definidos pesos que variam de 1 a 5 para verificar o desempenho de cada opção. Não foi necessário estipular intervalos com valores específicos diferentes de 0,5 para cada critério, o que facilitou a interpretação dos resultados. Desta forma, alcançou-se um resultado onde as alternativas propostas foram hierarquizadas, indicando quais as alternativas mais convenientes para a solução do problema estudado.

Para o auxílio da decisão, foi utilizada a ferramenta estatística Ponderação Aditiva Simples, este método ajuda na tomada de decisão quanto à aceitação ou rejeição de uma determinada hipótese, nela o Agente Decisor estabelece pesos e uma avaliação numérica dos valores intra-atributo.

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{ij}$$

Onde:

V_i : é a pontuação final atribuída a alternativa i

W_j : é o peso do critério j

V_{ij} : é a pontuação atribuída a alternativa i sob critério j

n : é o número total de critérios

A avaliação ocorreu através da soma dos produtos dos valores atribuídos para os critérios pelo peso de importância estabelecido, a alternativa com maior somatório foi aquela preferível para o Agente Decisor (SOUZA, 1998).

5 RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 Estimativa da produção do lodo da ETE em estudo

O empreendimento ao qual a ETE atende é composto por cinco blocos residenciais, cada um com 72 apartamentos. Considerou-se a ocupação média de 5 habitantes por apartamento e a contribuição diária de 200 litros por habitante. As contribuições diárias e de carga orgânica foram adotadas de conforme a Tabela 8, adaptada da tabela "Contribuição diária de despejos e de carga orgânica por tipo de prédio e de ocupantes" da NBR 13969 de 1997 - "Tanques Sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação".

Tabela 8 — Dados do empreendimento

DADOS	CARACTERÍSTICAS
Ocupantes	Permanentes e temporários
Uso	Residencial
Nº de apartamentos	72 apt
Nº de Blocos	5 blocos
Ocupação Média	5 hab/apt
População total	1800 hab
Contribuição per capita em Litros/dia	200 Litros/hab.dia

Fonte: Adaptado de: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997)

Primeiramente, foi calculado a quantidade de lodo produzida na fase de tratamento anaeróbia, para Von Sperling e Gonçalves (2014) as características do lodo produzido e descartado da fase líquida em filtros anaeróbios ficam na faixa de 7 a 9 gSS/hab.dia de massa produzida e 0,2 a 1,8 L/hab.dia de volume gerado, para o cálculo utilizou-se a média destes valores.

Massa do lodo produzida no reator anaeróbio no período de 6 meses:

$$\text{Massa lodo anaeróbio} = 8 \frac{\text{gSS}}{\text{hab}} \text{ dia} \cdot 1800 \text{ hab} \cdot 180 \text{ dias} \quad (1)$$

$$\text{Massa lodo anaeróbio} = 2592 \text{ kg} \quad (2)$$

$$\text{Massa lodo anaeróbio} = 2,59 \text{ toneladas} \quad (3)$$

Para o cálculo da quantidade de lodo produzida na etapa de tratamento aeróbio foi considerada a captura de sólidos que ocorreu na fase anterior do tratamento do lodo, para isso foi calculado a eficiência do tratamento anaeróbio na remoção de SS totais (sólidos secos totais).

$$Ess = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot T^{-0,50}) \quad (4)$$

$$Ess = 100 \cdot (1 - 0,68 \cdot 12^{-0,50}) \quad (5)$$

$$Ess = 74,89 \% \quad (6)$$

Onde:

Ess: Eficiência do reator anaeróbio em termos de remoção de SS

T: Tempo de detenção hidráulica

De acordo com Von Sperling e Gonçalves (2014) para as características do lodo secundário proveniente do processo de lodos ativados convencional fica na faixa de 25 a 35 gSS/hab.dia de massa produzida e 2,5 a 6,0 L/hab.dia de volume gerado, para o cálculo utilizou-se a média destes valores. Desta forma, pode-se afirmar que a estimativa da produção de lodo num período de 6 meses na ETE em estudo foi de 5,03 toneladas de lodo seco.

$$\text{Massa lodo aneróbio} = 30 \frac{\text{gSS}}{\text{hab}} \text{ dia} \cdot 1800 \text{ hab} \cdot 180 \text{ dias} \cdot (1 - 0,7489) \quad (7)$$

$$\text{Massa lodo aneróbio} = 2440 \text{ kg} \quad (8)$$

$$\text{Massa lodo aneróbio} = 2,440 \text{ toneladas} \quad (9)$$

$$\text{Massa lodo total} = 2,59 + 2,44 \quad (10)$$

$$\text{Massa lodo total} = 5,03 \text{ toneladas} \quad (11)$$

Por ser um sistema combinado de tratamento de esgoto, o lodo produzido é do tipo misto, ou seja, suas características são uma composição dos lodos que lhe deram origem. Em sistemas de tratamento de esgoto com metabolismo anaeróbio, geralmente apresentam uma baixa produção de lodo, pois o resíduo sofre naturalmente um processo de estabilização e adensamento, devido ao tempo maior de permanência do lodo (idade do lodo) (Metcalf e Eddy, 2002). Já em metabolismos aeróbios ocorre uma produção maior de lodo porque seu tempo de detenção é mais baixo, gerando um lodo com menor concentração de sólidos (GRADY; DAIGGER; LIM, 1999, p. 562).

Outro fator de importante consideração foi a eficiência e estabilidade do processo de digestão anaeróbia, estas variáveis influenciam diretamente nas características do lodo produzido, para fins de cálculo utilizou-se a eficiência informada no memorial descritivo da estação. Devido a essas características foi realizada uma ponderação para a estimativa da produção de lodo da ETE. Através da relação de DQO e SS produzidos, pode-se estimar a quantidade de lodo seco produzido em um período de 6 meses, mas como o gerenciamento de lodo é realizado em sua forma líquida, faz-se necessário estimar a produção semestral deste resíduo no seu estado físico de origem.

Segundo Ludovice (2014) recomenda-se que a concentração de sólidos na alimentação do digestor esteja entre 4% a 8%, podendo atingir valores superiores e Von Sperling e Gonçalves (2014) indica que podemos assumir a densidade do lodo de 1000kg/m³. Com essas características, pode-se estimar uma produção de 62,8 toneladas de lodo no estado líquido. Valor bastante coerente comparado ao dimensionado no memorial descritivo da ETE, que estimou a produção de 0,281 m³/dia que leva a uma produção semestral de 50,58 toneladas.

Essa estimativa de produção de lodo em ETE instalada em condomínio residencial demonstra ainda a relevância do quantitativo de lodo gerado por

instalação, ao extrapolado para a realidade local em função dos inúmeros empreendimentos residenciais que a cidade possui, revela-se em um potencial de resíduo a ser gerado no ciclo de manutenção destas unidades.

No âmbito do município de Manaus, foi criado por meio da Lei nº 1.192 de 31 de dezembro de 2007, o Programa de Tratamento e Uso Racional das Águas nas edificações, – PRO-ÁGUAS. Nele foi estabelecido pelo Art. 3º que as novas edificações devem dispor de tratamento de esgoto com características domésticas.

A exigência aplica-se aos empreendimentos potencialmente poluidores, públicos ou privados, cujo número de usuários seja superior a 40 (quarenta) pessoas dia, na área urbana e de transição desprovida de sistema público de esgoto, que são obrigados a instalar um sistema de esgoto de características domésticas, composto das seguintes fases (Art. 7º da Lei Pro-Águas): pré-tratamento, tratamento primário, tratamento secundário e desinfecção.

Portanto, tal obrigatoriedade impõe a perspectiva de propor soluções para a destinação de todo esse volume de lodo a ser gerado e ainda de alinhar-se as práticas de destinação final ambientalmente correta, conforme preconizado nas prioridades da Política Nacional de Resíduo Sólidos (BRASIL, 2010), o que então, justifica-se a análise posterior do presente trabalho.

5.2 Análise dos critérios de avaliação e pesos

A análise do conjunto de critérios, em certas situações, torna-se bastante complexa e pode ser comprometida pela escassez de dados. Neste "item" foram comentados alguns aspectos importantes para a escolha final de alternativas. A metodologia proposta não pretende esgotar a discussão sobre o tema, tem-se como objetivo a tentativa de ordenar alguns conceitos, simplificando a análise final pelo grupo envolvido na tomada de decisões.

Desta forma, foram definidos 5 (cinco) critérios que representam os principais aspectos que influenciam na tomada de decisão para a escolha de projetos de aplicação de lodo de esgoto na cidade de Manaus. Martins (2016), realizou em estudo sobre a priorização de projetos em estações de tratamento de esgotos no Município de Unaí (MG) e utilizou critérios semelhantes aos deste trabalho. Vale lembrar que os critérios considerados foram definidos em função do caso específico, onde podem apresentar graus de importância variável em casos diferentes. Para o caso em estudo, os critérios escolhidos foram:

- Ambiental;
- Legal;
- Econômico;

- Técnico;
- Social-urbano.

5.2.1 Critério ambiental

Para a análise das alternativas de processamento e destinação final do lodo sob a ótica sustentável foi adotada uma hierarquização das opções possíveis, onde segundo Fernandes et al. (2014) deve haver uma preocupação no sentido de:

- Diminuir a produção, utilizando-se tecnologias de tratamento de esgotos que produzam menor quantidade de lodo. Embora os vários tipos de tratamento de esgoto apresentem variações na produção de lodo, a margem de manobra neste ponto é limitada, pois quanto melhor a qualidade do esgoto tratado, maior será quantidade de lodo produzido.
- Produzir lodo de melhor qualidade, através da definição de critérios para recebimento de esgotos industriais na rede coletora pública, principalmente no que se refere ao seu conteúdo de metais pesados, garantindo a produção de um lodo de composição compatível com seu uso agrícola;
- Reciclar ao máximo o lodo produzido. Neste caso, o uso agrícola é a alternativa mais utilizada no mundo, juntamente com a recuperação de áreas degradadas, pastagens e silvicultura.

Alternativas de eliminação final do lodo através de incineração, *landfarming* e disposição em aterros sanitários devem consideradas apenas quando a valorização do lodo for impossível, seja porque o lodo apresenta contaminações ou então quando nas áreas próximas à estação não existam solos adequados ou disponíveis.

Também foram considerados os impactos ambientais causados pelas alternativas de disposição final. Os principais impactos ambientais considerados no gerenciamento do lodo, são:

- Geração de odores;
- Atração de insetos;
- Ruídos;
- Riscos sanitários;
- Contaminação do ar;
- Contaminação do solo e subsolo;
- Contaminação das águas superficiais e subterrâneas;
- Valorização ou desvalorização de áreas próximas;
- Incômodos a população afetada

Ainda para Fernandes et al. (2014), a avaliação destes fatores deve ser em função das condições locais da ETE e em função da tecnologia empregada. Desta forma para a construção da matriz de resultados o critério ambiental foi subdividido em dois subcritérios, estes foram:

1. Impactos ambientais negativos - Onde foram analisadas as alterações do meio ambiente ocasionadas pela forma de destinação final em questão, que afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, a biota, as

condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais.

2. Nível de reaproveitamento de lodo - Neste, levou-se em consideração o quanto reaproveitado será o lodo produzido, buscando priorizar as alternativas que reciclam o máximo possível este resíduo.

Em ambos subcritérios adotou-se o peso máximo, 5 (cinco), pois a priorização do olhar sustentável sob a elaboração e execução de projetos tornou-se prioridade em todo o mundo. Hoje muitos países já adotam instrumentos legais e econômicos de incentivo a reciclagem e de redução de impactos ambientais negativos, como o de restrições ao uso de aterros, o que influencia profundamente a decisão sobre a disposição final do lodo.

5.2.2 Critérios Legais

O tratamento e destino final de lodo de esgoto é uma atividade sujeita à Licenciamento Ambiental, e as condições de restrição legais devem ser conhecidas antes da decisão final sobre qual a tecnologia de processamento e a forma de destino final do lodo. Apesar da importância, no Brasil, até 2006 não haviam diretrizes legais que estabelecessem critérios para a disposição final do lodo como subproduto valorado de uma ETE (MATTA, 2011), até que nesse mesmo ano foi regulamentada a Resolução CONAMA Nº 375/2006 que definiu os critérios e procedimentos para o uso agrícola desses resíduos. Já no ano de 2010, foi instituída a Lei Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos e mais recentemente, em 2020, foi regulamentada a Resolução Nº 498/2020 (CONAMA, 2020) que definiu critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos.

Desta forma, para a construção da matriz de resultados, de modo a homogeneizar a análise, os critérios legais foram mesurados através do nível de alinhamento aos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), portanto se priorizaram alternativas que apresentem os melhores aspectos de proteção da saúde pública e de qualidade ambiental, de não geração, redução, reutilização e reciclagem dos resíduos. Neste critério adotou-se o peso 3 (três).

5.2.3 Critérios Econômicos

Este critério avaliou os custos que envolvem o processamento do lodo, transporte e disposição final, ou seja, os elementos que compõe o investimento para implantação, operação e administração de todo o processo de tratamento e

destinação final. Para a análise dos custos de modo mais homogêneo, os custos foram agrupados por natureza, de modo a tornar mais clara a comparação.

Os itens considerados na composição de custos de investimentos foram:

- Áreas necessárias às construções, instalações de equipamentos, pátios de estocagem ou compostagem;
- Equipamentos a serem utilizados;
- Material de manuseio (bombas, esteiras, tratores, caminhões)
- Obras civis (fundações para instalação de equipamentos. galpões, áreas concretadas ou asfaltadas, etc)
- Instalações elétricas;
- Gastos imprevistos

Os itens considerados na composição de custos de amortização e operação:

- Obras civis (amortização de 20 anos);
- Equipamentos eletromecânicos;
- Manutenção de equipamentos;
- Energia;
- Matérias primas;
- Transporte e manuseio;
- Mão de obra;
- Gestão e controle

Para Batista (2015) esses itens devem ser considerados para a estruturação de uma análise de Custos e Benefícios dos aspectos técnicos e econômicos relacionados ao gerenciamento e operacionalização das alternativas elencadas. Desta maneira foram analisados dois subcritérios, um que considerou o o custo de implantação e concepção do projeto e o segundo que considerou o custo de operação e manutenção.

Em ambos foram adotados o peso máximo de 5 (cinco) pois estes são os critérios mais fundamentais e limitantes para a execução de qualquer projeto de destinação final de lodo, pois apesar do lodo representar apenas 1% a 2% do volume do esgoto tratado, os custos relacionados a seu gerenciamento representam em média de 20% a 60% dos gastos totais de operação de uma estação de tratamento de esgoto (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

5.2.4 Critérios Técnicos

Neste critério foi analisada de uma forma preliminar o desempenho das

alternativas técnicas consideradas em escala compatível com o estudo de caso. A utilização de tecnologias importadas e/ou inovadoras foi analisada de forma crítica, pois nem sempre são viáveis nas condições locais ou podem provocar problemas de manutenção. Priorizaram-se alternativas com simplicidade técnica e operacional. Para a matriz de resultados foram considerados três subcritérios e seus respectivos pesos:

- I. Complexidade de implantação e ampliação - Peso 3;
- II. Complexidade de operação e manutenção - Peso 4;
- III. Eficiência na remoção de patógenos - Peso 2.

5.2.5 Critérios Social-Urbanos

Os impactos gerados na sociedade também foram considerados para a escolha da alternativa de destinação final do lodo da ETE, estes aspectos influenciam na disponibilidade de aceitação da população em relação à alternativa adotada. De acordo com Mancuso e Santos (2002) a opinião da população tem cada vez mais influenciado um número crescente de municípios do Brasil a adotarem o tratamento e destinação adequada de seus resíduos.

Uma escolha que influencie na criação de empregos e geração de renda, afetando direta ou indiretamente à comunidade do local empregado, terá um grau de aceitabilidade bem maior da população, pois amplia o acesso da população a serviços e bens de consumo, por isso para a montagem da matriz de resultados, priorizaram-se alternativas com reaproveitamento do lodo à alternativas que não proporcionam este retorno, como o emprego em aterros sanitários.

A demanda por área também foi um fator considerado, pois para o caso em estudo este é um limitador, pois a ETE encontra-se em uma área urbanamente consolidada, neste caso a possibilidade de tratamento e destinação final em lugares distantes da estação de tratamento implicaram em maiores custos de transporte e armazenamento. Para a análise foram adotados 3 (três) subcritérios e como os aspectos socio-urbanos possuem alta intangibilidade e difícil mensuração de seu grau de aceitação pela população, adotaram-se pesos menores para estes quesitos, para evitar falhas de interpretação.

- I. Demanda por área - Peso 1;
- II. Aceitabilidade da população - Peso 2;
- III. Geração de benefícios à população - Peso 2.

Tabela 9 — Lista de critérios adotados (continua)

CRITÉRIOS AMBIENTAIS

Tabela 9 — Lista de critérios adotados (conclusão)

Impactos Ambientais	5
Nível de reaproveitamento do lodo	5
CRITÉRIOS ECONÔMICOS	
Custo de implantação e concepção	5
Custo de operação e manutenção	5
CRITÉRIOS LEGAIS	
Alinhamento com a PNRS	3
CRITÉRIOS TÉCNICOS	
Complexidade de implantação e ampliação	3
Complexidade de operação e manutenção	4
Eficiência na remoção de patógenos	2
CRITÉRIOS SOCIO-URBANOS	
Demanda por área	1
Aceitabilidade da população	2
Geração de benefícios à população	2

Fonte: O autor (2021)

5.3 Análise das alternativas de destinação final da ETE

Esta etapa considerou a apresentação do objetivo principal deste trabalho no que cerne o estudo de soluções e alternativas potenciais de destinação final do lodo da ETE condominial em estudo. Existem diversas alternativas tecnicamente aceitáveis para essa disposição, entretanto a escolha de uma delas deve contemplar dentre os critérios de análise, os que foram relacionadas de forma preliminar neste estudo, desta forma optou-se por analisar todas as alternativas de destinação final potencialmente, passíveis de aplicação na cidade de Manaus. Inclusive foram incluídas aquelas em que a aplicação não pode ser vislumbrada no curto prazo.

Como a ETE em estudo não possui etapas de tratamento de lodo, os requisitos de qualidade do lodo para os usos identificados também foram considerados, por exemplo, os custos necessários para a adequação a certa alternativa de destinação e os padrões de qualidade estabelecidos pela legislação foram fatores preponderantes na análise e influenciaram na montagem da matriz de resultados.

Foram consideradas as alternativas mais comuns de destinação final praticadas atualmente no Brasil como afirma Mendes (2012), fato que permitiu maior

embasamento teórico sobre o tema, devido a um levantamento mais rico de informações e pesquisas sobre os temas. As alternativas consideradas foram: a disposição em aterros sanitários, a incineração, o *landfarming*, o uso agrícola, a recuperação de áreas degradadas e o uso do lodo na produção de substrato vegetal conforme ordenado no Quadro 7.

Quadro 7 — Alternativas analisadas para a destinação final do lodo

Item	Tipo de Alternativa
1	Disposição em aterros sanitários
2	Incineração
3	Landfarming
4	Uso Agrícola
5	Recuperação de áreas degradadas
6	Uso de lodo na produção de substrato vegetal

Fonte: O autor (2021)

O uso do lodo de esgoto na construção civil, apesar de estar alinhado com as atuais diretrizes ambientais, não foi considerado, pois os principais estudos, apesar de apresentarem resultados positivos, ainda não se mostram viáveis no ponto de vista econômico, pois sua aplicação está intimamente associada ao valor de mercado dos produtos gerados a partir de resíduos, dos custos do processo de reciclagem, dos custos da disposição final e dos potenciais impactos ambientais decorrentes.

Por meio dos Quadros 8 e 9 foram elencadas as principais vantagens e desvantagens das alternativas de disposição final estudadas, assim como foram realizados comentários pertinentes em cada um dos casos. A análise crítica sustentou-se principalmente no contexto local da ETE em estudo, embasou-se a produção pelo referencial teórico obtido através da pesquisa de autores que realizaram estudos sobre o tema.

Quadro 8 — Alternativas de disposição final sem uso benéfico

Alternativas de Disposição Final	Vantagens	Desvantagens	Comentários
Disposição em aterros sanitários	<p>Não necessita estabilização do lodo.</p> <p>Flexibilidade para receber quantidades variáveis de lodo.</p>	<p>Não há reuso ou reciclagem do lodo.</p> <p>Exigência de teor de sólidos entre 35 e 40%, para reduzir o volume do lodo e a produção de lixiviado.</p> <p>A degradação do lodo gera subprodutos que devem ser gerenciados.</p> <p>Alta demanda por áreas.</p> <p>Geração de maus odores, atração de vetores.</p>	<p>Alternativa pode ser aplicada nos casos em que as características dos lodos não se enquadrem nos requisitos de usos benéficos do resíduo.</p> <p>Pode ser utilizada codisposição em o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.</p> <p>A cidade de Manaus possui apenas um Aterro Controlado, sem a estrutura ideal para gerenciamento do lixiviado.</p> <p>A construção de um aterro sanitário exclusivo para o lodo da ETE não é uma alternativa economicamente viável, apresentando baixo custo efetivo.</p>
Incineração	<p>Pode ser usada como alternativa de contingência.</p> <p>A alternativa que assegura a maior redução no volume do lodo.</p> <p>Não exige estabilização prévia do lodo.</p>	<p>Apresenta elevado custo por tonelada tratada.</p> <p>Emissão de gases na atmosfera, como dióxido de carbono e dióxido de enxofre, cujos efeitos negativos à saúde humana são extensos e graves.</p> <p>Requer destinação final adequada das cinzas residuais.</p> <p>Alto custo de instalação e operação.</p> <p>Não há reuso ou reciclagem do lodo.</p>	<p>Políticas globais de meio ambiente, como a Convenção de Estocolmo de 2001, tratam a incineração como uma alternativa de destinação final de resíduos que deve ter sem emprego diminuído.</p> <p>Necessidade de controle da emissão atmosférica dos incineradores.</p>
Landfarming	<p>Permite a disposição de elevadas doses de lodo por vários anos.</p> <p>As taxas de aplicação de lodo neste sistema são bem superiores às taxas comumente aplicadas na agricultura.</p> <p>Não exige estabilização prévia do lodo.</p>	<p>Operação complexa.</p> <p>Contaminação do solo e águas subterrâneas, se não operado adequadamente.</p> <p>Não há uso benéfico dos nutrientes e matéria orgânica do lodo.</p> <p>A disposição continuada de metais pesados e compostos químicos tóxicos inviabiliza áreas de landfarming para o uso futuros, como na agricultura.</p> <p>Alta demanda por áreas.</p> <p>Elevados custos de operação e instalação.</p>	<p>Torna-se viável quando aplicado em grande escala, devendo respeitar rígidos critérios ambientais, tornando o emprego desta tecnologia complexo.</p> <p>Não há aproveitamento dos nutrientes do lodo.</p> <p>Segundo a NBR 13984 de 1997, o landfarming deve ser aplicado a uma distância mínima de 200 metros de qualquer corpo hídrico, o que limita a aplicação desta alternativa próximo ao ponto gerador do resíduo.</p> <p>As instalações possuem período de vida útil</p>

Fonte: O autor (2021)

Quadro 9 — Alternativas de disposição final com uso benéfico

Alternativas de Disposição Final	Vantagens	Desvantagens	Comentários
Uso agrícola	<p>Promove o aproveitamento de macro e micronutrientes.</p> <p>Reduz a aplicação de fertilizantes químicos.</p> <p>Promove melhorias nas condições físicas do solo.</p> <p>Opção de baixo custo e com impacto ambiental positivo.</p> <p>É considerada uma solução definitiva para o trato final do lodo, na qual transforma um resíduo em um relevante insumo agrícola.</p>	<p>Pode provocar a contaminação por metais pesados e compostos tóxicos, devidos às características acumulativas desses elementos.</p> <p>Ausência de estudos sobre a aplicação em culturas típicas da região Norte.</p> <p>A reciclagem direta do lodo é vetada pelos critérios estabelecidos nas normas, para ser utilizado na agricultura deve-se realizar previamente as etapas de estabilização da matéria orgânica e de higienização para redução do nível de patógenos.</p> <p>Pode provocar a contaminação por agentes patogênicos, caso sejam dispostos sem o controle adequado.</p>	<p>A legislação proíbe a utilização de lodo em culturas onde a parte comestível entre em contato com o solo, assim como tubérculos, raízes e olerícolas.</p> <p>As dinâmicas de ciclagem dos nutrientes variam de acordo com a cultura agrícola em questão, diferenciando-se na quantidade de água, macronutrientes e micronutrientes necessários para o produto agrícola final.</p> <p>Existem pesquisas sobre o aproveitamento deste resíduo para culturas de milho, cana-de-açúcar, aveia, trigo, arroz, feijão, girassol, soja, café e pêssego.</p>
Recuperação de áreas degradadas	<p>As taxas de aplicação neste tipo de destinação são bastante elevadas, podendo alcançar até 450 toneladas por hectare.</p> <p>Promove a reciclagem do fósforo.</p> <p>Promove melhorias nas condições físicas do solo.</p>	<p>Pode provocar a contaminação por metais pesados e compostos tóxicos, devidos às características acumulativas desses elementos.</p> <p>Pode provocar a contaminação por agentes patogênicos, caso sejam dispostos sem o controle adequado.</p> <p>Ainda é necessário o desenvolvimento de pesquisas a respeito do tema, com o propósito de orientar sua aplicabilidade de forma segura.</p>	<p>Muitas áreas de exploração de areia, cascalho, argila e outros continuam sem recuperação e o uso do lodo poderia favorecer a execução dos PRADs.</p> <p>Deve respeitar os parâmetros estabelecidos pe Resolução CONAMA N° 498/2020 que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos.</p> <p>Necessita-se de pesquisas que aprofundem nas reações químicas entre lodo e solo, assim como os perigos de sua lixiviação e contaminação das águas superficiais e subterrâneas.</p>
Uso do lodo na produção de substrato vegetal	<p>Promove o uso integrado de resíduos (lodode ETE, lodo de ETA, resíduos de poda).</p> <p>Reduz custo com o uso de fertilizantes minerais.</p> <p>Aceita concentrações mais elevadas de metais pesados, desde que não prejudique a atividade fisiológica.</p> <p>Se destina à produção de madeira, não afetando a cadeia alimentar humana.</p>	<p>Composição variável, devido aos diferentes resíduos que podem ser utilizados.</p> <p>Existem poucas pesquisas sobre a aplicação de lodo como substrato vegetal de espécies florestais amazônicas.</p> <p>Necessidade de grandes quantidades de resíduos estruturantes.</p>	<p>A cidade de Manaus possui grandes áreas de jardins e parques, com elevada demanda de mudas para manutenção dessas áreas.</p> <p>Apesar dos promissores resultados sobre os riscos de contaminação por metais pesados, ainda é necessário maiores estudos para comprovar que esse biossólido pode ser utilizado, pois o efeito destes contaminantes no solo e nas plantas a médio e longo prazo ainda são pouco conhecidos.</p>

Fonte: O autor (2021)

Dentre os principais trabalhos e pesquisas consultados, vale citar o de Batista (2015), que estudou sobre a aptidão para condicionamento, utilização e disposição final de lodos gerados em ETEs do Distrito Federal. Já Andreoli (2001), coordenou a execução de pesquisas sobre aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos. Ressalta-se também a publicação "Lodo de esgotos: tratamento e disposição final" de Andreoli, Sperling e

Fernandes (2001), que destaca a importância do gerenciamento do lodo, envolvendo os aspectos de tratamento e disposição final.

5.4 Matriz de alternativas de destinação do lodo

Definidas as alternativas de destinação final, os critérios de avaliação e seus pesos, foi realizado a construção da matriz de alternativas de destinação do lodo. Nesta fase cada alternativa recebeu uma pontuação segundo o critério avaliado, a escala utilizada variou entre 1 a 5, sendo diretamente proporcional ao desempenho positivo das alternativas, ou seja, os valores próximos de 1 (um) são considerados “não satisfatórios” e aqueles próximos de 5 (cinco) são considerados “satisfatórios”.

Tabela 10 — Matriz de alternativas de destinação do lodo

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	ALTERNATIVAS						PESOS
	Disposição em aterros sanitários	Incineração	Landfarming	Uso agrícola	Recuperação de áreas degradadas	Produção de substrato vegetal	
Impactos Ambientais negativos	1,0	2,0	2,0	4,5	3,0	3,5	5
Nível de reaproveitamento do lodo	1,0	1,0	1,0	5,0	3,0	3,0	5
Custo de implantação e concepção	1,5	1,0	3,0	3,0	4,5	4,0	5
Custo de operação e manutenção	1,5	1,0	2,5	4,0	5,0	4,0	5
Atendimento à PNRS	2,0	3,5	3,0	2,0	3,0	4,0	3
Demanda por área	1,0	5,0	1,5	2,5	3,0	3,0	1
Aceitabilidade da população	3,5	4,0	2,0	1,0	3,5	2,5	2
Geração de benefícios à população	2,0	1,0	1,5	5,0	3,5	3,5	2
Complexidade de implantação e ampliação	2,0	2,0	3,0	2,0	2,5	3,0	3
Complexidade de operação e manutenção	1,5	1,0	4,0	2,0	2,0	2,0	4
Eficiência na remoção de patógenos	1,0	5,0	3,0	3,5	1,5	2,5	2

Fonte: O autor (2021)

Analisando a Tabela 10, pode-se observar a importância do peso atribuído a cada critério de avaliação e sua influência no processo de decisão. Destacam-se os critérios de impactos ambientais negativos, nível de reaproveitamento do solo, custo de implantação e concepção, e custo de operação e manutenção, que dentre os critérios elencados possuem o maior peso atribuído.

Nos critérios econômicos, quanto menor a pontuação, maior o custo necessário para a execução das atividades relacionadas a destinação escolhida e nos critérios ambientais, quanto maior a pontuação, mais ambientalmente correta foi a alternativa analisada. Todavia, outros critérios como aceitabilidade da população e

geração de benefícios à população receberam pesos menores, por serem de difícil tangibilidade e pela ausência de pesquisas e coleta de dados. No entanto, sabe-se da importância que a aceitabilidade da população possui no processo de tomada de decisão (MANCUSO; SANTOS, 2002).

Quando comparadas as opções de tratamento que fazem o beneficiamento do lodo com as que não fazem, fica evidente uma distinção entre as alternativas. Sob a ótica econômica, as opções que fazem o uso benéfico do resíduo apresentam valores mais satisfatórios à realidade do caso em estudo, pois não necessitam de investimentos tão grandes para instalação e operação. Diferentemente das demais, que, por exemplo necessitam de grandes custos com a aquisição de equipamentos e obras civis.

Entendimento semelhante pode ser aplicado em relação aos critérios ambientais, as alternativas que beneficiam o lodo de alguma maneira se destacaram, pois por fazerem o reuso ou reciclagem dos resíduos, conseqüentemente acabam se enquadrando às atuais políticas ambientais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que tem como um de seus objetivos a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada destes rejeitos.

A partir da organização dos dados por meio da matriz de resultados para escolha da potencialidade de alternativa de disposição final do lodo de esgoto produzido por uma ETE condominial localizada na cidade de Manaus, alcançou-se a classificação das alternativas conforme o método Ponderação Aditiva Simples, utilizado para o auxílio à decisão de problemas com multicritério.

Tabela 11 — Classificação das alternativas de destinação final do lodo

Ordem	Alternativa de disposição final	Pontuação
1º	Uso Agrícola	124
2º	Recuperação de áreas degradadas	122
3º	Produção de substrato vegetal	121,4
4º	Landfarming	91
5º	Incineração	70,5
6º	Disposição em aterros sanitários	57

Fonte: O autor (2021)

Conforme exposto na Tabela 11, obteve-se o resultado da análise tecnológica quando aplicados pesos aos critérios estabelecidos, assim evidenciou-se que a alternativa de uso agrícola mostrou-se preferível em relação às demais. Entretanto,

ressalta-se que as alternativas de recuperação de áreas degradadas e de produção de substrato vegetal, que apresentam algum tipo de reuso ou reciclagem do lodo, apresentaram bons desempenhos no contexto analisado. Observa-se que, para o caso estudado, as alternativas de *landfarming*, incineração e disposição em aterros sanitários apresentaram desempenhos inferiores às três primeiras opções.

Embora o uso agrícola do lodo tenha mostrado-se preferível às outras alternativas, muitos aspectos próprios desta solução devem ser considerados antes de sua aplicação, que exige um gerenciamento criterioso para completa segurança sanitária e ambiental, portanto se faz necessário conhecer os elementos que podem gerar impactos negativos ao ser humano e ao meio ambiente. Desta forma a alternativa de recuperação de áreas degradadas pode-se mostrar mais viável, visto o menor grau de exigências para aplicação no solo.

Para Betiol e Camargo (2000), deve-se conhecer a composição química dos lodos, bem como a dinâmica dos nutrientes após aplicação no solo, além disso, deve ser monitorada a concentração de elementos tóxicos e agentes patogênicos. De tal forma que os resultados obtidos gerem apenas benefícios agrônômicos, evitando impactos ambientais negativos.

No caso da ETE estudada, por o manejo do lodo ser realizado no estado líquido e o volume total de lodo produzido não ser muito alto, produção de um condomínio em relação a toda cidade, pode ser preparada a reciclagem agrícola utilizando as etapas de tratamento de adensamento, estabilização e higienização, dispensando-se a etapa de desidratação (BATISTA, 2015), para isso deve-se buscar uma cultura agrícola cultivada próxima da fonte geradora do resíduo.

Hoje já existem pesquisas evidenciando o potencial do uso agrícola do lodo em algumas culturas, Melo e Marques (2000) apresentaram informações sobre o uso do lodo em culturas de cana-de-açúcar, milho, sorgo e azevém, entretanto ainda são carentes pesquisas sobre esta aplicação em culturas agrícolas cultivadas no município de Manaus. O uso em outros municípios do Amazonas tornam-se mais inviáveis devidos aos custos relacionados com o armazenamento e transporte do biossólido para estes locais.

Já o *landfarming*, diferentemente do uso agrícola, apresenta menor restrição de lançamento de contaminantes no solo, o que leva a uma maior taxa de aplicação. Entretanto, nessas áreas, as restrições ambientais são muito mais rígidas, pois de acordo com Andreoli (2001) recebem maior intervenção tecnológica e monitoramento contínuo, o que torna o emprego desta tecnologia complexo e oneroso.

A incineração, apesar de ser uma das principais alternativas utilizadas nos Estados Unidos, Europa e Japão (BETTIOL, et al., 2001), não se encontra alinhada

com as novas políticas ambientais adotadas pelo Brasil, que a partir da assinatura e ratificação da Convenção Estocolmo 2001, comprometeu-se a eliminar as fontes geradoras de poluentes orgânicos persistentes, onde se enquadram os incineradores.

A aplicação do lodo em aterros sanitários não se apresentou como uma prática sustentável, pois não tem a preocupação em recuperar os nutrientes presentes no lodo, além disso, essa forma de disposição requer muitas adaptações a depender do aterro em questão, por exemplo, no estado de São Paulo definiu-se que a umidade do lodo seja inferior a 60% e que a quantidade de lodo depositado no aterro não, seja superior a 5% do total de resíduos depositados (LUDUVICE, 2001), o que torna-se um fator limitante para a utilização em larga escala desta alternativa.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por principal objetivo, avaliar os critérios para a seleção e alternativas de destinação final do lodo de esgoto sanitário provenientes de ETEs localizada em um condomínio na cidade de Manaus, com foco em auxiliar a análise das questões que envolvem a problemática do tratamento e disposição do lodo e fornecer orientações para o processo de tomada de decisão na seleção das alternativas.

Neste sentido, este trabalho foi importante, pois em Manaus o gerenciamento do lodo de esgoto tem sido negligenciado, segundo Fernandes et al. (2014) os projetos de ETE raramente detalham a forma de disposição final do lodo, justamente a etapa mais complexa e cara do sistema, que pode representar até 60% do custo operacional de uma estação.

Demonstrando a necessidade de apontar alternativas seguras e inseridas no contexto local para o descarte do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário, pois se entende que vai além das obrigações legais e se torna cada vez mais urgente, dada a suas características potenciais de contaminação no ambiente e sua relação com a saúde pública e o alinhamento as premissas da sustentabilidade.

As principais alternativas da destinação do lodo de esgoto no cenário brasileiro descritas foram a disposição em aterros sanitários, a incineração, o *landfarming*, o uso agrícola, a recuperação de áreas degradadas e o uso do lodo na produção de substrato vegetal (BATISTA, 2015). E os critérios identificados utilizados na seleção de alternativas aplicado ao estudo de caso foram relacionados aos ambientais, técnicos, econômicos, legais e social-urbanos.

Neste sentido, a metodologia multicritério demonstrou ser uma importante ferramenta de auxílio à decisão em projetos de sistemas de esgotamento sanitário, pois se observou que o método de Ponderação Aditiva Simples, possui facilidade de aplicação e julgamento, hierarquizando de maneira direta as alternativas analisadas.

Por meio deste método, para o lodo gerado na ETE em estudo, considerando o mesmo não apresentar tratamento adicional, mostraram-se preferíveis as soluções com usos benéficos do bio-sólido, destacando-se a reciclagem agrícola. Essa tendência, pode ser explicada pela relevância aplicada ao nível de atendimento dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos e à análise de custo-benefício dos aspectos técnicos e econômicos relacionados ao gerenciamento e operacionalização das alternativas elencadas.

Para o uso agrícola, permitiu-se observar preliminarmente que o lodo de esgoto de origem doméstica, normalmente não apresenta restrições quanto a

qualidade (FERNANDES et al., 2014), entretanto o volume de lodo gerado em uma ETE e o transporte deste resíduo para reuso são um fator crítico para a viabilidade econômica desta alternativa. Nesse sentido, com base nos dados obtidos sobre a ETE em estudo, foi estimada a geração de 50,03 toneladas de lodo líquido a cada período de 6 (seis) meses.

Do ponto de vista técnico, para a aplicação agrícola, os maiores obstáculos para a implementação deste uso estão associados, primeiramente, ao emprego de um processo de higienização do lodo, para atender aos padrões previstos na Resolução CONAMA Nº 375/2006, além de garantir a redução de umidade, visando a redução de custos com transporte e manejo do lodo.

Contudo, neste percurso foi possível observar que dependendo das características quali-quantitativas e da realidade local, o lodo de esgoto gerado em ETEs instaladas em empreendimentos residenciais possui potencial de reaproveitamento, aqui sinalizado como práticas agrícola quando atendido as exigências legais,

Por fim, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se realizar o estudo em conjunto com viabilidade técnica e econômica da utilização de lodo de ETE condominial em alguma cultura agrícola cultivada no município de Manaus. O estudo técnico seria de extrema importância para avaliar a qualidade do lodo produzido e propor possíveis adequações, para atender às diretrizes legais de aplicação. O estudo de viabilidade econômica seria importante para compreender a quantidade de lodo necessária e os custos envolvidos no manejo do lodo, para garantir que a execução do projeto seja viável.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL. **Resíduo do tratamento de água ajuda na recuperação de áreas degradadas**. <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/>. Distrito Federal, 2015. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2015/06/23/residuo-do-tratamento-de-agua-ajuda-na-recuperacao-de-areas-degradadas/>. Acesso em: 1 nov. 2021.
- AISSE, Miguel M *et al.*; Tratamento e Destino Final do Lodo Gerado em Reatores Anaeróbios. *In*: CAMPOS, José R (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 271-298.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, Eduardo S.; FERNANDES, F.. Disposição do lodo no solo. *In*: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 8, p. 317-392. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).
- ANDREOLI, C.V (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, 2006. 417 p.
- ANDREOLI, C.V (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p. (Projeto PROSAB).
- ANDREOLI, C.V (Coord.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba : PROSAB, 1999.
- ANDREOLI, Cleverson V. *et al.* Secagem e Higienização de Lodos com Aproveitamento do Biogás. *In*: CASSINI, Sérgio Túlio (Coord.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMA, 2003. 210 p. cap. 5, p. 121-161. (Projeto PROSAB).
- ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2001. 444 p.
- ANDREOLI, Cleverson V. (Coord.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13894: Tratamento no solo (landfarming)**. Rio de Janeiro, 1997. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE ITU. **Uso agrícola do lodo de esgoto**. Aeaitu. Itu, 2016. Disponível em: <https://aeaitu.org.br/uso-agricola-do-lodo-de-esgoto/>. Acesso em: 18 abr. 2021.

BASTOS, R. K. *et al.* Análise Crítica da Legislação Brasileira para Uso Agrícola de Lodos de Esgotos na Perspectiva da Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico. **Revista Aidis**, v. 2, n. 1, p. 143-159, 2009.

BATISTA, L. F. **Lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal**: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final. Brasília, 2015. 197 p Tese (Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

BETIOL, W; CAMARGO, O. A.. **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna, 2000. 19 p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A.. **Lodo de Esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. 1 ed. Jaguariúna: Embrapa, 2006. 349 p.

BEZERRA, F.B. *et al.* **Lodo de esgoto em revegetação de áreas degradadas**. Brasília: EMBRAPA, v. 41, 2006, p. 469-476.

BITTON, G . **Wastewater microbiology**. Nova Iorque: Ed. Wiley, 2001.

BOEIRA, R.C. *et al.* Recuperação de Área Degradada com Lodo de Esgoto e Espécies Florestais. *In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA*, n. 2003. Anais [...] Brasília, 2003.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 01 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 de agosto de 2010, ano 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 3 dez. 2021.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019: Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il., 1 jan. 2020.

CAMPOS, J.R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 271-299.

CETESB. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação (Norma P4.230)**. São Paulo: CETESB, 1999.

CHAKRABORTY, S. *et al.* Effectiveness of sewage sludge ash combined with waste pozzolanic minerals in developing sustainable construction material: An alternative approach for waste management. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, n. 16, p. 1449-1530, 2011.

CLAUREN, M. M.. **Determinação das Espécies de Cromo nas Cinzas da Incineração de Couro Wet-Blue em Reatores de Leito Fixo e Leito Fluidizado**.

Porto Alegre , f. 90, 2001 Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)
- Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 375, de 28 de agosto de 2006. **Diário Oficial**, Brasília, 30 de agosto de 2006, ano 2006.

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 498, de 18 de agosto de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, ano 2020.

CORDEIRO, B. S.. **A Gestão de Lodos de Fossas Sépticas: Uma Abordagem por Meio da Análise Multiobjetivo e Multicritério**. Brasília, 2010 Dissertação (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. *In*: BETTIOL, Wagner; CAMARGO, Otávio A. de . **Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgotos**. Jaguariúna: Embrapa, 2000.

FERNANDES, Fernando *et al*. Avaliação das alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 7, p. 297-316. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

FERREIRA, A.C. Destino final do lodo. *In*: ANDREOLI, Cleverson V. (Coord.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: PROSAB, 1999. 98 p. cap. 2, p. 18-20.

FORESTI, *et al*. *In*: CAMPOS, J. R.. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo..** Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p. (Projeto PROSAB).

FORNARI, Ernani. **Manual Pratico de Agroecologia**. PasTest Ltd, f. 119, 2001. 237 p.

GONÇALVES; LUDIVICE, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, Fernando. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 5, p. 157-255. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

GRADY, L; DAIGGER, G.T.; LIM, H. C.. **Biological wastewater treatment: theory and applications**. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1999.

GUEDES, Izabel. **Águas de Manaus pretende elevar cobertura de esgoto para 80% da capital até 2030**. Acrítica.com. Manaus, 2019. Disponível em: <https://www.acritica.com/channels/especiais-3b7127e7-0b22-4a69-b4a5-7fecfe9c0f00/news/esgoto-tratado-volta-limpo-a-natureza>. Acesso em: 31 out. 2021.

GUILHERME, A. H. L.. **Estudo das reações durante a incineração de resíduos químicos - aspectos cinético e termodinâmico**. Curitiba, 2000. 132 p Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba,

2000.

IMHOFF, K.R.. **Desenvolvimento das Estações de Tratamento de Esgotos**: In: Manual de tratamento de águas residuárias. São Paulo, 1986, p. 127-129.

LOURENÇO, R. S. **Utilização de lodo de esgoto aeróbio e calado em florestas**. EMBRAPA, 1997. 3 p. (Comunicado técnico,18).

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 9, p. 397-420. (Princípios do tratamento biológicos de águas residuárias).

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodo. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 4, p. 121-155. (Princípios do tratamento biológico de águas residencias).

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. *In*: LODOS de Esgoto - Tratamento e Disposição Final. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 484 p.

LUDUVICE, Maurício. Processos de estabilização de lodos. *In*: ANDREOLI, C.V; VON SPERLING, M; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 4, p. 121-155. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

LUNA, Ysa *et al*. Caracterização de lodo anaeróbio produzido em reatores de manta de lodo de baixo tempo de retenção sólidos. **DAE**, São Paulo, v. 67, p. 24-34, 30 jul 2019.

LUPATINE, G. *et al*. Tratamento de lodo de fossa/tanque séptico. *In*: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Lodo de fossa e tanque séptico: Caracterização, Tecnologias de Tratamento, Gerenciamento e Destino Dinal**. Curitiba: Editora ABES, 2009, p. 76-180.

MAJOER, J.D.. auna Studies and lande reclamation technology: a review of the history and need for such studies. *In*: MAJOER, J.D.. **Animals and primary sucession: the role od fauna in reclaimed lands**. Londres: Cambridge University Press, 1989, p. 3-33.

Manaus (AM). CREA-AM. Planta Baixa - E.T.E. Cond. Mundi Resort Residencial (Ilhas Europa). Registro em: 14 jan. 2021.

MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H.F.. **Reuso de água**. 1 ed. Barueri: Editora Manole, 2002. 550 p.

MARTINS, F. N. **Análise multicritério e multiobjetivo de priorização de projetos em estações de tratamento de esgotos no município de Unaí (MG)**. Fortaleza, 2016 Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2016.

MATCALF, B; EDDY, I.N.C. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse**. 3 ed. Nova Iorque: McGraw-Hil, 1991, p. 796-926.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. *In*: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A.. **Impacto ambiental e uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000, p. 109-141.

MENDES, J.C.. **Estudo da aplicabilidade do lodo de uma ETE como fonte alternativa de nutrientes em solo construído**. Criciúma , f. 28, 2012 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma , 2012.

MENDES, J.C.. **Esudo da Aplicabilidade de Lodo de uma ETE como Fonte Alternativa de Nutrientes em Solo Construído**. Criciúma, 2012. 62 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade do Extremo Sul Catarinense.

METCALF; EDDY. **Waste water engineering: Treatment, disposal and reuse**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002. 1334 p.

MIKI, M. K.; ALÉM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C.. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.. **Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. (Projeto PROSAB).

MÄDER NETTO, O. S. *et al*. Estudo das variações de pH no lodo caleado em função de diferentes dosagens de óxido de cálcio e teores de umidade. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, n. 22. 2003, Joinville.

NEUMANN, G . **Tratamento de Efluentes – São João Nepomuceno**. Guilhermeneumann. São João Nepomuceno, 2015. Disponível em: <https://guilhermeneumann.wordpress.com/2015/06/23/tratamento-de-efluentes-sao-joao-nepomuceno/>. Acesso em: 17 abr. 2021.

NOGUEIRA, A.C.F; SANSON, Fábio; PESSOA, Karen. A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. XIII. 2007. Anais [...]. 2007. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.17.45/doc/5427-5434.pdf>. Acesso em: 31 out. 2021.

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R; GOLÇALVES, R. F.. “Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. *In*: ANAIS DO XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, Cancun:Mexico, 2002.

PEDROZA, J.P. *et al*. Produção e componentes do algodoeiro herbáceo em função da aplicação de biossólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 483-488, 2003.

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

PINTO. Higienização de lodos. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, Fernando. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 6, p. 259-294. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

POGGIANI, F.; SILVA, P.H.; GUEDES, M,C.. Uso de Lodo em Plantações Florestais. *In*: ANDREOLI (Coord.). **Alternativa de Uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p. cap. 6, p. 159-188.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S.. Conceito, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. *In*: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO, H.. **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

SAITO, Renan H. **Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE - Piracicamirim, Piracicaba-SP**. São José dos Campos, f. 145, 2013 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

SANEPAR. **Companhia de Saneamento do Paraná: Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. 1997. 96 p.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D.. Alternativa agrônômica para o bioossólido: a experiência de Brasília. *In*: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000, p. 143-152.

SILVA, Kenia K.. **Avaliação do desempenho de sistemas de tratamento aeróbio e anaeróbio e das características do lodo de esgoto doméstico**. Recife, f. 132, 2004 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco.

SKORUPA, L.A. *et al.* Uso do Lodo de Esgoto na Recuperação de Áreas Degradadas. *In*: ANDREOLI, C.V. (Coord.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. cap. 7, p. 189-234.

SOLOMON, C. *et al.* **Septage Management**. Fact Sheet. 4 p.

SOUZA, M.A.A. **Um modelo para seleção de processos de tratamento de águas residuárias municipais**. Brasília, 1998 Monografia (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília.

TAMANINI, C.R.. **Recuperação de áreas degradadas com a utilização de bioossólidos e gramínea forrageira**. Curitiba, 2004. 181 p Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná.

TSUTIYA, M.T.. Alternativas de disposição final de bioossólido. *In*: TSUTIYA, M,T *et al.* **Bioossólidos na agricultura**.. São Paulo: SABESP, Escola Politécnica – USP, ESALQ, UNESP, 2001b, p. 133-180.

UFSC. **Compostagem**. Rede de Gestão Sustentável. Florianópolis , 2013.

Disponível em:

<http://redegestaosustentavel.blogspot.com/2013/06/compostagem.html>. Acesso em: 18 abr. 2021.

USEPA. **A plain English guide to EPA Part 503 Biossolids**. Washington: USEPA, 1994. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biossolids-rule.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2021.

VAN HAANDEL, A.C; ALEM SOBRINHO, P.. **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p. (Projeto PROSAB).

VAN HAANDEL, Adrianus van; CAVALCANTI, Paula F.F; ANDREOLI, Cleverson Vitorio (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**.. Curitiba: FINEP, 2001. 257 p.

VAN OORSCHOT, R; WAAL, D; SIMPLE, L. Options for beneficial reuse of biossolids in Victoria. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 8, p. 15-122, 2000.

VON SPERLING, M; GONÇALVES, R. F. Lodos de esgoto: característica e produção. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição**. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 6, 2014. 444 p. cap. 2, p. 15-65. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

VON SPERLING, Marcos; GONÇALVES, Ricardo Franci. Lodo de esgoto: Características e produção. *In*: ANDREOLI, Cleverson V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Ferdando. **Lodo de tratamento: Tratamento e disposição final**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 6, f. 444, 2014. 444 p. cap. 2, p. 15-65. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais).

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Operation of municipal wastewater treatment plants**. 5 ed. 1996.