

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ELEN NAIARA FERNANDES MACHADO

**ANÁLISE DE CRITÉRIOS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DO LODO GERADO PELA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE ITABAIANA – SE**

SÃO CRISTÓVÃO/SE

2022

ELEN NAIARA FERNANDES MACHADO

**ANÁLISE DE CRITÉRIOS PARA A DESTINAÇÃO FINAL DO LODO GERADO PELA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE ITABAIANA – SE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Ambiental da
Universidade Federal de Sergipe como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Joel Alonso Palomino
Romero.

SÃO CRISTÓVÃO/SE

2022

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido e aprovado pela banca examinadora em 17/11/2022 como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Joel Alonso Palomino Romero
Universidade Federal de Sergipe – DEAM/CCET/UFS

Prof. Dr. José Jailton Marques
Universidade Federal de Sergipe – DEAM/CCET/UFS

Prof. Dr. Jefferson Arlen Freitas
Universidade Federal de Sergipe – DEAM/CCET/UFS

É concedida à Universidade Federal de Sergipe permissão para reproduzir cópias desta monografia e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho acadêmico pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Elen Naiara Fernandes Machado

MACHADO, Elen Naiara F.

Análise de critérios para a destinação final do lodo gerado pela Estação de Tratamento de Efluentes no município de Itabaiana – SE. Elen Naiara Fernandes Machado, 2022.

Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Ambiental, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

I. Tratamento de Efluentes. II. Impactos nos recursos hídricos. III. Manejo do lodo de esgoto.

À Deus, por ser meu porto seguro; por ser meu
amparo nos dias de lutas e por derramar bênçãos
sem medidas na minha vida;

Aos meus pais por serem a minha base e
fortaleza;

E a mim, por existir E nunca desistir de lutar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à Deus, pela oportunidade de realizar o curso de Engenharia Ambiental e Sanitária numa Universidade Federal, e por me mostrar que os Seus planos são melhores que os meus. Sou imensamente grata pelo cuidado, amor e pela sua misericórdia durante toda a minha vida.

Aos meus pais, Joel e Nadjane por serem meus maiores incentivadores e por nunca desistirem de mim, dando suporte e sustento para que fosse possível que mais uma etapa da minha vida fosse concluída. Por acreditarem no meu diploma em engenharia mesmo quando eu por tantas vezes quis desistir, e por todo ensinamento passado nestes anos.

Aos meus irmãos, Joel e Sara, por todo o apoio, amor, companheirismo nestes anos. Por acreditarem em mim, e comemorar comigo as vitórias e por estarem sempre comigo em tempos difíceis.

Às minhas avós, Suzana e Ivanette, por suas orações para que Deus me protegesse nestes anos longe de casa, e por todo amor, zelo e várias comidas gostosas. Amo demais vocês.

À minha família, Fernandes e Machado, pelo auxílio para mobiliar a casa para que pudesse mudar de Estado, e por nunca me deixarem cair, por sempre demonstrarem amor durante toda a minha vida.

Ao meu esposo, Joeli César, por ser a minha família em Aracaju, pela parceria, por ser meu companheiro, por cuidar tão bem de mim e por me dar uma nova família, agradeço pelos anos juntos e por mais que virão. A vida é muito boa ao seu lado, meu bem. Te amo, obrigada por tudo.

À Jocimar Jr., Matheus Santana, Fernanda Stingelin, por serem melhores amigos, pela parceira e apoio, por compartilharem sonhos comigo, por serem presentes de Deus na minha vida. Amo vocês, meus surtados.

Aos meus amigos, Renan Gama, Maiara Luciana, Crislene Esteves, por compartilhar comigo os seus sonhos, e me ajudarem nesta caminhada. Grata por ter vocês na minha vida.

Ao Professor Dr. Joel Alonso, por me auxiliar neste último período da Universidade e pelos ensinamentos acadêmicos adquiridos.

A UFS, e ao DEAM pelos conhecimentos adquiridos durante estes anos.

RESUMO

O avanço da urbanização sob os recursos naturais é um problema que tem aumentado nos últimos anos. Em todo o mundo, quase não existe um ecossistema que não tenha tido interferência direta e/ou indireta do homem. Toda atividade antrópica gera efluentes, e há uma crescente exigência na melhora nos sistemas de esgotamento sanitário na busca de garantir um meio ambiente sustentável para as gerações futuras. Neste sentido, a gestão do lodo, resíduo proveniente de sistemas de tratamento de efluentes, tem se tornando um problema de grande complexidade e de alto custo, podendo chegar entre 20 e 60% do custo total da operação de um sistema de tratamento de efluentes. As principais alternativas para a destinação final do lodo de efluente são: disposição em aterros sanitários, incineração, *landfarming*, recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola. No presente trabalho foram analisadas alternativas de disposição final para o lodo de efluente do município de Itabaiana – SE, o qual não dispõe de um gerenciamento adequado para a destinação final deste resíduo. Desse modo, o trabalho tem como objetivo principal analisar alternativas de disposição final a partir da aplicação de metodologia de análise de multicritérios para auxílio da decisão da melhor alternativa de acordo com as condições da ETE em estudo. O estudo foi realizado em 5 (cinco) etapas principais: levantamento teórico, estimativa da produção de lodo, definição dos critérios e os pesos, indicação de alternativas para disposição final do lodo e a construção de uma matriz de decisões com o auxílio do método estatístico de Ponderação Aditiva Simples. Os resultados e discussões obtidas através da construção da matriz e a aplicação do método estatístico indicaram que a reciclagem agrícola se mostra a alternativa segura e factível para a destinação final do lodo. Pode-se concluir, que a reciclagem agrícola é uma alternativa que fornece benefícios ambientais e econômicos e não necessitam de grandes investimentos para a implantação da alternativa na ETE e se enquadra nos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos em reaproveitar, reciclar e destinar o lodo de forma ambientalmente adequada.

Palavras-chave: Lodo de esgoto, disposição final, reuso, fins agrícolas.

ABSTRACT

The advance of urbanization at cost of natural resources is a problem that has increased in the last few years. All around the world, there is almost no ecosystem which was not interfered directly or indirectly by the man and his actions. Every anthropic activity generates effluents, and there is a growing demand on the improvement of sanitary sewage system, pursuing a guarantee that the future generations will have a sustainable environment. In that regard, the mud management, the residuum that comes from these stations has become a high cost and high complexity problem, costing between 20 and 60% of total operation cost of an STS. The main alternatives for the final destination of the effluent mud are disposal in landfills, incineration, landfarming, recovery of degraded areas and agricultural recycling. In this study, were analysed the alternatives to the mud effluents final disposal in the Itabaiana City, Sergipe State, which does not have the adequate management of this residuum. Thus, this work has as the main goal, analyse alternatives to the final disposal through the multicriteria methodology of analysis to support the decision pursuing the best alternative accordingly the Itabaiana STS. The review was accomplished in 5 (five) major phases, theoretical survey, estimate calculation of mud production, definition of criteria and influences, final disposal alternatives indications and a construction of a matrix decision with the Simple Additive Weighting (SWA) statistical method aid. The results and arguments obtained through the decisions matrix construction and the application of SWA method, indicates that the agriculture recycling process is the most trustworthy and feasible method to apply as a final destination to the mud production. It can be concluded that, agricultural recycling is an alternative that provides a range of environmental and economic benefits and does not require high investment in the STS to its implementation, and yet, fits into the goals of National Solid Waste Politics, reusing, recycling and allocating all the effluents mud in a very adequate and ecological way.

Keywords: Sewer sludge, final discharge, reuse, agricultural purpose

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre o volume e o teor de água no lodo	31
Figura 2 – Fluxograma do processo de compostagem	38
Figura 3 – Fluxograma das etapas de realizações do trabalho	49
Figura 4 – Mapa de localização do município de Itabaiana - SE	50
Figura 5 – Comparação entre os índices de esgoto tratado em relação ao consumo de água	51
Figura 6 – Fluxograma básico para o gerenciamento do tratamento e destino final do lodo de efluente	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volume de lodo produzido nos sistemas de tratamento de efluentes	22
Tabela 2 – Concentração média de tipos de fertilizantes orgânicos em relação aos seus nutrientes.	25
Tabela 3 – Concentrações genéricas de alguns metais pesados no ambiente e em alguns resíduos.	27
Tabela 4 – Quantidade de cal requerida para atingir o pH de ordem 12.	39
Tabela 5 – Concentração máxima permitida no lodo de efluente ou produto derivado – substâncias inorgânicas.....	45
Tabela 6 – Lista de critérios, subcritérios e pesos adotados.	65
Tabela 7 – Matriz de decisões para a escolha da alternativa de disposição final.	75
Tabela 8 – Classificação das alternativas de disposição final para a ETE- Itabaiana.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação de lodo de ETE's	21
Quadro 2 – Estágios da digestão anaeróbia no tratamento de efluentes.....	24
Quadro 3 – Etapas de gerenciamento do lodo	30
Quadro 4 – Relação entre os tipos de adensamento e suas características	32
Quadro 5 – Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final.....	33
Quadro 6 – Vantagens e desvantagens de desaguamento mecânico	36
Quadro 7 – Vantagens e desvantagens dos processos de desaguamento natural	37
Quadro 8 – Dados para a estimativa da produção de lodo	57
Quadro 9 – Alternativas analisadas para a disposição final do lodo da ETE- Itabaiana	59
Quadro 10 – Itens para avaliação dos custos de implantação	61
Quadro 11 – Itens para avaliação dos custos de operação e manutenção	61
Quadro 12 – Principais alternativa para disposição final do lodo de ETE (continua) ..	71
Quadro 12 – Principais alternativa para disposição final do lodo de ETE (continua) ..	72
Quadro 12 – Principais alternativa para disposição final do lodo de ETE (conclusão)	73
Quadro 13 – Principais impactos ambientais relacionados as alternativas de disposição final de lodo de efluente	74

LISTA DE SIGLAS

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

ETE – Estação de Tratamento de Efluente

NBR – Norma Brasileira

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 Efluente Sanitário Doméstico	18
3.2 Poluição dos recursos hídricos - Eutrofização	18
3.3 Tratamento de Efluentes Sanitários.....	19
3.4 Aspectos gerais sobre lodo de esgoto domésticos	20
3.4.1 <i>Características dos lodos de ETE's</i>	<i>20</i>
3.4.2 <i>Lodos produzidos em processos anaeróbios</i>	<i>22</i>
3.4.3 <i>Lodos produzidos em processos aeróbios</i>	<i>23</i>
3.4.4 <i>Nutrientes.....</i>	<i>24</i>
3.4.5 <i>Principais contaminantes do lodo</i>	<i>26</i>
3.4.5.1 <i>Metais pesados.....</i>	<i>26</i>
3.4.5.2 <i>Agentes Patogênicos</i>	<i>28</i>
3.4.5.3 <i>Poluentes orgânicos.....</i>	<i>29</i>
3.5 Manejo do lodo proveniente de ETE	29
3.5.1 <i>Adensamento</i>	<i>30</i>
3.5.2 <i>Estabilização.....</i>	<i>32</i>
3.5.3 <i>Condicionamento</i>	<i>34</i>
3.5.4 <i>Desaguamento</i>	<i>35</i>
3.5.4.1 <i>Desaguamento mecânico</i>	<i>35</i>
3.5.4.2 <i>Desaguamento natural.....</i>	<i>36</i>
3.5.5 <i>Higienização do lodo produzido em ETE's</i>	<i>37</i>
3.5.5.1 <i>Compostagem</i>	<i>37</i>
3.5.5.2 <i>Calagem.....</i>	<i>38</i>
3.5.5.3 <i>Tratamento térmico</i>	<i>39</i>
3.6 Disposição final	40
3.6.1 <i>Disposição em aterros sanitários</i>	<i>40</i>
3.6.2 <i>Incineração</i>	<i>41</i>
3.6.3 <i>Incineração com obtenção de água potável e cogeração de energia.....</i>	<i>42</i>
3.6.4 <i>Landfarming.....</i>	<i>43</i>

3.6.5	<i>Uso benéfico do lodo na agricultura</i>	44
3.6.6	<i>Uso do lodo para recuperação de áreas degradadas</i>	46
3.6.7	<i>Uso do lodo para reflorestamento</i>	47
3.6.8	<i>Uso do lodo na produção de substrato vegetal</i>	47
3.6.9	<i>Uso benéfico do lodo na construção civil</i>	47
3.7	Análise de Multicritério	48
4.	METODOLOGIA	49
4.1	Área de estudo	50
4.2	Estudo de caso – ETE Itabaiana/SE	52
4.2.1	<i>Caracterização da ETE – Itabaiana/SE</i>	52
4.2.2	<i>Tratamento Preliminar</i>	52
4.2.3	<i>Tratamento Primário – Fase Anaeróbia</i>	53
4.2.4	<i>Tratamento Secundário – Fase Aeróbia</i>	53
4.2.5	<i>Decantadores Secundários</i>	54
4.2.6	<i>Desinfecção por hipoclorito de cloro</i>	54
4.2.7	<i>Destinação do lodo da ETE</i>	54
4.3	Estimativa de produção de lodo na ETE	55
4.4	Avaliação e definição de critérios e pesos para as alternativas	58
4.4.1	<i>Critérios econômicos</i>	60
4.4.2	<i>Critérios ambientais</i>	62
4.4.3	<i>Critérios sociais</i>	63
4.4.4	<i>Critérios técnicos</i>	64
4.4.5	<i>Critérios legais</i>	64
4.5	Elaboração da matriz de decisões	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1	Estimativa de produção de lodo na ETE - Itabaiana	67
5.2	Análise das alternativas para disposição final do lodo de ETE	70
5.3	Análise da matriz de decisões	75
6.	CONCLUSÕES	79
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1. INTRODUÇÃO

Toda atividade antrópica gera efluentes, e se não tratados adequadamente, tornam-se disseminadores de doenças, contaminam solos, e os lençóis freáticos que são utilizados para abastecimento urbano.

No Brasil, os índices de tratamento de efluentes são baixos em relação ao volume de esgoto gerado. Os serviços de saneamento são essenciais para manter o equilíbrio entre o homem e o meio ambiente, desta forma as agências ambientais juntamente com a sociedade começaram a exigir melhores condições no padrão de qualidade ambiental. Em razão disto, existe uma grande expectativa de aumento da quantidade de Estações de Tratamento de Efluentes – ETE no país, e, em consequência disto, aumento da produção de lodo (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2014).

Quando não há resíduos industriais presentes no sistema de tratamento de efluentes, os percentuais médios da composição do lodo de esgoto são: água com 99,87 %; 0,04 % de sólidos sedimentares; 0,02 % sólidos não sedimentáveis e 0,07 % outras substâncias dissolvidas.

A questão relacionada aos resíduos sólidos tem sido um dos problemas mais agravantes da humanidade, devido a crescente concentração urbana. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2016), o país possui cerca de 76,5 milhões de pessoas que sofrem os impactos negativos causados pela destinação inadequada dos resíduos sólidos.

Neste cenário, a disposição final do lodo, resíduo gerado pelo tratamento de efluentes, tem se tornado um grande impasse para os governantes e as agências responsáveis pelo setor.

O termo lodo é caracterizado como subprodutos sólidos provenientes do tratamento de efluentes. O lodo é formado nos processos biológicos quando parte das substâncias orgânicas são absorvidas e convertidas, sendo composto basicamente por sólidos biológicos, e deste modo são denominados de biossólido. No entanto, para que o termo biossólido possa ser aplicado, é indispensável que suas características químicas e biológicas estejam de acordo com uma função produtiva, como, o uso do lodo como nutrientes na agricultura (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2014).

O manejo do lodo deve atuar no aumento do tratamento correto, na redução da

produção, na reutilização, reciclagem e na destinação final adequada. Estas exigências tornam a operação cara e por isso a maioria das empresas responsáveis pelos serviços de saneamento não incluem o manejo do lodo em seus projetos, o que leva a adotarem alternativas inadequadas para a disposição final do lodo.

A disposição final do lodo é uma etapa essencial para o saneamento básico, pois a prática de disposição inadequada invalida uma parte da coleta e o tratamento de efluentes. Porém, o custo para implantar alternativas para a disposição deste subproduto pode abranger até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento de efluentes. Portanto, as empresas prestadoras de serviços de saneamento juntamente com os governantes devem buscar alternativas seguras e baratas, com a ajuda de pesquisas científicas e tecnológicas para que este subproduto não resulte em um novo problema ambiental, e sim um recurso ambiental com sua disposição final (BETTIOL; CAMARGO, 2005).

O tratamento de efluentes domésticos gera uma grande produção de lodo, resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes. O uso do lodo de efluentes na agricultura e para fins florestais têm sido uma prática de grande interesse. Esta alternativa tem a capacidade de tornar o resíduo em um insumo agrícola, fornecendo matéria orgânica e nutrientes para o solo (BATISTA, 2015).

No presente trabalho são discutidas alternativas para a destinação final do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) localizada no município de Itabaiana – SE. O sistema de esgotamento sanitário da cidade de Itabaiana abrange apenas a área central urbana e a alguns conjuntos habitacionais recentemente implantados. Observa-se que o município possui um déficit nos serviços de saneamento básico para a população, o que provoca o descarte irregular de esgoto doméstico, sendo a principal fonte de poluição dos corpos hídricos.

Este trabalho procura indicar as alternativas seguras e factíveis para a destinação final do lodo de efluente da ETE, através de análises de critérios relevantes para a destinação final do lodo, pois se compreende que é uma questão cada vez mais necessária, de acordo com seu potencial de contaminação dos recursos naturais e a sua relação com a saúde pública. Outro ponto importante deste trabalho, é demonstrar a importância de alternativas sustentáveis voltadas a esse subproduto, já que possui um grande potencial benéfico ambiental e sanitário.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral analisar critérios para auxiliar na escolha de alternativas de destinação final dos lodos de efluentes sanitários gerados na Estação de Tratamento de Efluentes do município de Itabaiana – SE.

2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar as principais alternativas da destinação final do lodo biológico no país;
- Verificar critérios utilizados na escolha de alternativas de destinação final do lodo, aplicado ao estudo de caso;
- Recomendar as alternativas com maiores potenciais de destinação final do lodo de efluente da ETE – Itabaiana.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Efluentes Sanitários

A geração de efluentes sanitários de um município é proveniente de três fontes diferentes: efluentes domésticos (residências, comércio, instituições); águas de infiltração e despejos industriais. O efluente doméstico é composto por cerca de 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos. As características dos efluentes variam de acordo com a condição socioeconômica da população, o clima, as diversas aplicações no uso da água e nos costumes da população. O sistema mais frequente nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) no Brasil, é do tipo separador absoluto, ou seja, é realizada apenas a coleta de águas residuárias e a coleta de águas pluviais não contribuem à ETE (VON SPERLING, 1996).

O crescimento acelerado da urbanização acarreta o aumento do consumo de água, portanto gera uma grande proporção de águas residuais, nas quais não há possibilidade de reaproveitamento, e, ao serem lançadas de forma inadequada no meio ambiente poluem os corpos receptores, causam instabilidades ecológicas e torna inviável a utilização dos recursos naturais da área atingida (FREDDO, 2014).

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento – SNIS, apenas 55% da população são atendidos pela rede de esgotamento sanitário no Brasil, e 50,8% do efluente gerado é tratado (BRASIL, 2020). É essencial que a coleta e tratamento de efluentes seja ampliado para toda população pois a poluição dos recursos hídricos poderá prejudicar o abastecimento de águas em certas regiões do país, conter os impactos negativos da sua deposição indevida do efluente no ambiente receptor e diminuir os danos ambientais (QUINTANA, *et al.* 2011).

3.2 Poluição dos recursos hídricos – Eutrofização

A eutrofização é um processo que consiste no crescimento das concentrações de nutrientes em um ecossistema aquático, causando a poluição dos corpos d'água que, no decorrer do tempo, aumentam o nível da turbidez devido à diminuição da presença de oxigênio dissolvido na água.

Os lançamentos de efluentes domésticos não tratados nos corpos hídricos aceleram o processo de eutrofização nos recursos hídricos em função da alta quantidade de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, desenvolvendo um ambiente ideal para a reprodução de algas e macrófitas.

A contribuição de efluentes agrícolas, urbanos ou industriais nos corpos d'água, provocam a modificação na qualidade da água, como a diminuição do oxigênio e redução da diversidade de espécies aquáticas e vegetais. A maior consequência da eutrofização é a alta proliferação de organismos fito-planctônicos, fato conhecido como floração. A maior parte dos organismos presentes em florações de águas continentais são as cianobactérias e a sua presença nos recursos hídricos usados para abastecimento urbano podem causar risco à saúde humana (CARVALHO, M. do C. *et al.* 2013).

Portando, os efluentes devem passar pelo processo de tratamento para ajustarem à capacidade de diluição específica de cada corpo receptor. Tais tratamentos conseguem remover a maior parte da matéria orgânica e outros poluentes. Os processos mais utilizados como forma de tratamento são os biológicos, que usam os microrganismos existentes no efluente para degradação da matéria orgânica e desinfectar a água (SANEPAR; PROSAB, 1999).

3.3 Tratamento de Efluentes Sanitários

A expansão do tratamento de efluentes sanitários se torna necessário pois os despejos inadequados causam a contaminação de corpos d'água que são utilizados para abastecimento urbanos, e afetam o fornecimento de água em certas regiões do país que sofrem com a carência de água. Todavia, uma parcela da população brasileira não dispõe de serviços de saneamento básico, o que dificulta a redução dos impactos ambientais causados pelo despejo de efluente sem tratamento na natureza (QUINTANA *et al.*, 2011).

As Estações de Tratamento de Efluentes, têm como objetivo principal remover a matéria orgânica do efluente para obter as condições satisfatórias para o retorno ao meio ambiente, e conter os prejuízos ambientais causados pela contaminação dos recursos hídricos. O tratamento do efluente normalmente é realizado por processos biológicos, no qual bactérias são responsáveis pela remoção ou estabilização da matéria orgânica, e por ser um processo natural, possui um custo mais baixo e maior confiabilidade (BATISTA, 2015).

Ao tratar o efluente, a ETE gera resíduos de diversos tipos como: os líquidos (efluente tratado e líquido extraídos dos lodos), os gasosos (gases decorrentes do processo dos digestores anaeróbios) e os sólidos (lodo, areia, sólidos grosseiros). A produção de lodos proveniente dos processos de tratamento de efluentes, em grandes volumes, se torna um problema ambiental e prejudicial à saúde humana caso não seja tratado, reaproveitado ou disposto de forma correta (ANDREOLI, 2001). Este trabalho irá tratar sobre o lodo, que é um subproduto obtido no final do processo de tratamento de esgoto doméstico, e, sobre alternativas para a sua destinação final.

3.4 Aspectos gerais sobre lodo de esgoto domésticos

De acordo com a NBR 10.004/2004, o lodo de esgoto é um resíduo sólido classificado como Resíduo Classe II A – não inerte, ou seja, podem possuir propriedades, como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, tendo as seguintes características:

(...) resíduos nos estados sólido e semissólido, 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).

No que se refere à Lei 12.305/2005, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o lodo é definido como resíduo sólido proveniente dos serviços públicos de saneamento básico. O lodo de sistemas de tratamento de efluentes é formado basicamente por matéria orgânica e nutrientes, que podem reciclados ou reutilizados devido a sua capacidade de recuperar e/ou condicionar os solos (BRASIL, 2010).

3.4.1 Características dos lodos de ETE's

Os lodos são resíduos sólidos formados basicamente por seres heterotróficos, que desintegram toda a matéria orgânica presente em meio líquido, podendo ser classificados, como: primário, secundário ou misto; o lodo químico, biológico. A

classificação e as principais características de lodos provenientes de ETE's estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação de lodo de ETEs.

Tipo de Lodo	Características	Origem
Lodo primário	Resultante da sedimentação que ocorre nos decantadores primário; possui forte odor; sua digestão ocorre rapidamente em tanques fechados.	Tanque séptico; Decantador primário.
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	Resultante do crescimento de microrganismo aeróbios com menor teor de material orgânico e demandam maior para sua decomposição. Logo, resulta no lodo com menor teor de matéria orgânica e maior taxa de sólidos inorgânicos.	Lodos ativados – aeração; Reatores com baixa carga orgânica.
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	Resultante da digestão anaeróbia do próprio efluente que ocorre no fundo das lagoas ou reatores; não requer uma etapa de digestão posterior.	Lagoas de estabilização; Reatores anaeróbio.
Lodo químico	Resultante da precipitação química com sais metálicos ou com cal; pouco odor; taxa de decomposição menos do que o lodo primário.	Decantador primário com precipitação; Lodos ativados com precipitação química de fósforo.
Lodo misto	Este lodo possui a composição do tratamento que lhe deram origem.	Tratamento de efluentes primários e secundários.

Fonte: Adaptado de Andreoli, Sperling e Fernandes (2014).

O lodo gerado por processos aeróbios, dependendo da idade, apresenta uma taxa de 50% a 90% de massa bacteriana, e em processos anaeróbios a taxa de estar entre 2 e 20% (CAMPOS, 1999). A quantidade de lodo a ser gerado vai depender do tipo de tratamento de efluentes adotado, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Volume de lodo produzido nos sistemas de tratamento de efluentes.

Tipos de sistemas	Volume de lodo produzido (L/hab. dia)
Lagoas facultativas	0,05 – 0,15
Reator UASB	0,2 – 0,6
Lodos ativados convencionais	3,1 – 8,2
Aeração prologada	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).

3.4.2 Lodos produzidos em processos anaeróbios

O processo de digestão anaeróbia é caracterizado pela estabilização da matéria orgânica na ausência de oxigênio e ocorre em ambientes fechados. Este processo apresenta um percentual alto de eficiência e encontra-se presente em fossas sépticas domésticas e em sistemas de tratamento de efluentes sofisticados. A eficiência e estabilidade deste processo dependem diretamente das características do lodo que nutre o digestor, geralmente a acúmulo de macro e micronutrientes são o bastante para garantir o processo de digestão anaeróbia.

A matéria orgânica presente no esgoto afluente é a combinação de vários compostos sendo classificados da seguinte forma: material biodegradável e dissolvidos, sendo a fração solúvel, que possui potencial para ser utilizados pela massa bacteriana. E o material não biodegradável, sendo a fração particulada que é formada por material coloidal e macroscópico, que é a parte dos compostos que não são modificados pela ação bioquímica das bactérias no tempo de permanência em sistemas de tratamento de efluentes que necessita ser hidrolisado antes de ser utilizado (ANDREOLI, 2001).

Os elementos principais que condicionam a formação do lodo de efluentes nos processos anaeróbios estão relacionados a origem da matéria orgânica do afluente, caso haja uma fração alta de material particulado, logo, o lodo terá mais material biodegradável e particulado, aumentando assim a sua produção. Outro elemento importante é a idade do lodo, quanto maior for a sua idade, maior será a eliminação de matéria orgânica biodegradável. A temperatura também é importante pois influencia no teor dos processos biológicos, possuindo um valor máximo na faixa de 30 a 37°C, quanto menor for a temperatura mais lento será o processo metabólico, favorecendo o pH que deve ficar neutro para que a metagênese não seja afetada (VAN HAANDEL, CAVALCANTI, 2001).

Entre as vantagens deste tipo de tratamento pode-se destacar a redução de patógenos, pois o lodo bruto é formado por uma grande quantidade destes justamente durante o processo de digestão anaeróbia ocorre a estabilização destes organismos, fazendo com que sua presença seja reduzida significativamente, o que minimiza os riscos de transmissão de doenças e favorece a utilização do lodo como substrato para fins agrícolas (LUDIVICE, 2014).

3.4.3 Lodos produzidos em processos aeróbios

A operação da digestão aeróbia na geração do lodo, é caracterizada pela transformação da matéria orgânica biodegradável em dióxido de carbono, água e amônia através do processo de oxidação do material orgânico afluente. A degradação ocorre na presença de oxigênio, é um processo rápido desde o sistema seja alimentando constantemente por oxigênio (ANDREOLI; LARA; FERNANDES, 2001).

De acordo com Andreoli (2001) o processo de digestão aeróbia para a geração de lodo em sistemas de tratamento de efluentes é mais complexo devido há alguns fatores, como:

- ✓ o decaimento de lodo é expressivo, logo, deve-se levar em consideração a demanda de oxigênio para a respiração endógena e a geração de microrganismos no sistema de tratamento;

- ✓ o lodo ativado é instável, ou seja, ocorre a morte dos microrganismos ao final da aeração. Por isso, o lodo produzido em sistema aeróbio é introduzido em um digestor anaeróbio para a redução da massa bacteriana aeróbia;
- ✓ são produzidos dois tipos de lodo, o lodo primário e secundário;
- ✓ possuem uma taxa alta de material biodegradável, o que demanda mais uma etapa do sistema de tratamento, a estabilização do lodo.

Para a estabilização do lodo gerado pelo tratamento aeróbio existem três tipos de processos de digestão aeróbia. E suas principais características podem ser observadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de digestão aeróbias utilizadas na estabilização do lodo.

Tipos de digestões aeróbias	Características
Digestão aeróbia convencional	Estabiliza o excesso de lodo ativado utilizando ar difuso ou aeradores mecânicos para a redução do volume de lodo produzido.
Digestão aeróbia com oxigênio puro	O oxigênio puro substitui o ar como agente oxidante no processo de digestão aeróbia. E a sua utilização faz com que a concentração de sólidos no digestor atinja até 4% sem que haja a diminuição na taxa de transferência de oxigênio.
Digestão aeróbia termofílica	O processo de decomposição aeróbia da matéria orgânica ocorre na presença de calor, e a temperatura no interior do digestor pode chegar até 60°C. Este tipo de digestão pode estabilizar até 70% dos compostos orgânicos biodegradáveis do lodo em três dias.

Fonte: Luduvic (2014).

3.4.4 Nutrientes

O lodo gerado em sistemas de tratamento de esgotos é considerado uma fonte rica em nutrientes e matéria orgânica. Portanto, a partir das suas características nutritivas o lodo é denominado como biossólidos, que são sólidos do lodo de efluente que atendem as normas para a sua utilização no solo. Os biossólidos são ricos em N (Nitrogênio), P (Fósforo), S (Enxofre), Ca (Cálcio) e Mg (Magnésio), no entanto possui menores porções de K (Potássio) o que não supre totalmente às necessidades das plantas (COGGER; FORGE; NEILSEN, 2006).

Existe um grande interesse agrônômico da aplicação do biofóssido no solo, e os efeitos da aplicação podem ser observadas em longo prazo, quando a matéria orgânica presente no biofóssido entra em contato com o solo, iniciando as necessárias alterações físicas, químicas e biológicas. E pode-se observar em curto e médio prazo, os efeitos dos nutrientes, mas deve-se ter o cuidado de não ultrapassar a quantidade de nutrientes que a planta necessita para o seu desenvolvimento, taxas superiores podem causar riscos de contaminação de águas superficiais ou subterrâneas e diminuir a produtividade do solo (COSTA; COSTA, 2015).

O biofóssido comparado aos fertilizantes do mercado possui maiores concentrações de N (Nitrogênio), P (Fósforo) e K (Potássio) que geralmente são utilizados para fins de uso agrícola. A Tabela 2 mostra alguns valores médios de N, P e K de alguns fertilizantes e de lodo aeróbio.

Tabela 2 – Concentração média de tipos de fertilizantes orgânicos em relação aos seus nutrientes.

Identificação	Água (%)	Matéria Orgânica	N (%)	P (%)	K (%)
Lodo Aeróbio Calado	85,0	69,4	2,5	0,90	0,20
Lodo Anaeróbio	65,0	36,2	1,60	0,20	0,05
Esterco Bovino	83,5	14,6	0,30	1,17	0,10
Esterco Ovino	65,0	31,4	0,60	0,30	0,15
Esterco Suíno	81,0	12,0	0,60	0,60	0,30

Fonte: Ilhenfeld; Pegorini; Andreoli (1999).

Desse modo, o uso de resíduos orgânicos de origem urbana ou rural traz benefícios para a reciclagem e aumento da biodisponibilidade de alguns nutrientes vegetais. Junto com isso, houve um declínio na exigência de aplicações de insumos minerais ao longo dos anos. Essa troca de insumos agrícolas poderia resultar da diminuição da quantidade de matéria-prima necessária para a fabricação de fertilizantes minerais, na minimização dos custos de produção, o que melhoraria a qualidade ambiental (SILVA, 2008).

3.4.5 Principais contaminantes do lodo

Quando o lodo é produzido, o sistema de tratamento de efluente busca concentrar as impurezas e as substâncias potencialmente poluidoras neste subproduto. Desta forma, o lodo é formado por nutrientes, matéria orgânica, metais pesados, microrganismos e outros fatores que podem oferecer risco ao meio ambiente, se não forem controlados e monitorados (KELM, 2014).

A presença de tais elementos no lodo é muito variável, a quantidade a ser encontrada estará de acordo com as características do efluente bruto e do sistema de tratamento adotado. Por exemplo, o efluente doméstico, que apresenta teores baixos de metais pesados, o que não acarreta qualquer risco ambiental ou na saúde humana. A presença destes elementos pesados em efluentes domésticos ocorre quando há recebimento de efluentes industriais na rede coletora. Por isso, as empresas de saneamento devem possuir regras claras para o não recebimento de efluentes industriais em sua rede coletora para não comprometer a qualidade do lodo produzido (SILVA et al. 2014).

3.4.5.1 Metais pesados

O lodo de efluentes, possui características para ser um substrato para a nutrição do solo. Porém, a presença de metais pesados no lodo impossibilita a sua utilização em áreas agrícolas devido a sua toxicidade, causando a diminuição da produtividade. Do ponto de vista ambiental, o metal pesado pode ser definido como aquele que causa em determinadas concentrações e tempo de exposição, riscos ao meio ambiente e a saúde pública, afetando o mecanismo dos organismos vivos (SILVA et al., 2014).

A manutenção de compostos orgânicos no solo é essencial para aumentar a retenção de metais pesados, pois estes se tornam complexos junto com compostos orgânicos. A legislação brasileira enfatiza a necessidade de respeitar os limites teóricos de carga cumulativa total na aplicação de substâncias inorgânicas (COSTA; COSTA, 2015).

Os principais elementos químicos que são definidos como metais pesados são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. Entre os elementos mencionados As, Co, Cr, Cu, Se e Zn são fundamentais para o desenvolvimento dos organismos em certas quantidades, os demais não participam de qualquer função no metabolismo, além de serem tóxicos aos animais e plantas (SILVA et al., 2014).

Quando há a presença de metais pesados em efluentes domésticos, geralmente está ligada a descarga de efluentes industriais nas redes coletoras de efluentes urbanos, que ocorrem das principais atividades industriais: galvanoplastias, indústrias químicas (farmacêuticas, produção de compostos orgânicos e inorgânicos, indústria de petróleo e de produção de corantes e pigmentos) e indústrias metálicas (SILVA et al., 2014). A Tabela 3 apresenta alguns dados genéricos da presença de metais pesados no solo, em fertilizantes e esterco utilizados em áreas agrícolas, e na presença no biossólidos.

Tabela 3 – Concentrações genéricas de alguns metais pesados no ambiente e em alguns resíduos.

Metal	Solo agrícola (mg/kg)		Lodo de esgoto (mg/kg)	Fertilizantes (mg/kg)		Esterco – Brasil (mg/kg)	
	Europa	Brasil	Europa	Fosfatado	Nitrogenado	Suínos	Aves
Cádmio	0,01 – 2,4	2,8 – 3,2	1 – 3.400	0,1 – 170	0,05 – 8,5	0,58	0,33
Chumbo	2 – 300	14 – 94	29 – 3.600	7 – 225	2 – 27	19,6	5,9
Mercúrio	-	-	0,1 – 55	0,01 – 1,2	0,3 – 2,9	-	-
Níquel	2 – 1000	8 – 98	6 – 5.300	7 – 38	7 – 34	4,0	2,6
Zinco	10 – 300	5 – 194	91 – 4.900	50 – 1.450	1 – 42	1.670	151
Cobre	2 – 250	10 – 466	50 – 8.000	1 – 300	-	230	72,8
Cromo	5 – 1.500	4 – 145	8 – 40.600	66 – 245	3,2 – 19	19,3	15,9

Fontes: Canadian Water Guidelines (1993); Helou (2000), WHO (1996) apud Silva et al. (2014).

Vale ressaltar que os dados do Tabela 3 foram retirados de literaturas estrangeiras com a intenção de apresentar que os metais pesados estão presentes em vários meios, inclusive, em maiores concentrações no lodo.

À medida que o lodo se forma, junto com ele as bactérias co-precipitam os agentes patogênicos e metais pesados. Para garantir a qualidade do lodo, é necessário identificar previamente as fontes de efluentes industriais e retirá-las do sistema de coleta doméstica, já que os processos de eliminação de metais pesados são caros e pouco eficientes (ANDROELI et al., 1999).

3.4.5.2 Agentes patogênicos

Os organismos patogênicos presentes em efluentes sanitários são classificados em cinco grupos: fungos, vírus, bactérias, protozoários, helmintos. Em sistemas de tratamento de efluentes, os organismos patogênicos ficam adsorvidos à fragmentos sólidos que precipitam na fase de decantação, ou seja, concentram-se no lodo (ALAMINO, 2010). A concentração de patógenos encontrados nos lodos de efluente é bastante variável, pois depende de: condições socioeconômicas da comunidade; condições sanitárias; região geográfica; presença de indústrias agroalimentares; e do tipo de tratamento adotado para o lodo (SILVA et al., 2014).

Nos estudos epidemiológicos têm-se analisado os riscos de bactérias, vírus, ovos de helmintos e ciscos de protozoários presente no lodo de efluente. E tais riscos são causados (SILVA et al. 2014):

- ✓ pela alta frequência de parasitismo encontrada na população mundial;
- ✓ ao longo período de sobrevivência em ambientes externos para os helmintos;
- ✓ e pela dose infectante, ou seja, um ovo ou cisto é o suficiente para infectar o hospedeiro.

De acordo com a literatura, a quantidade de ovos de helmintos presentes no lodo pode variar na ordem de 10^3 a 10^4 , ao passo que o vírus pode variar entre 10 e 10^6 por quilograma de matéria seca (kg. MS) (SILVA et al., 2014). A concentração de agentes patogênicos no lodo de efluentes, é variável de uma localidade para outra e do tipo de sistema adotado para o tratamento do efluente e do lodo.

A aplicação do lodo de origem doméstica para os mais variáveis fins, sem o tratamento de estabilização, higienização e desinfecção do lodo, facilita a contaminação da saúde pública, do meio ambiente e dos animais, pela ação dos agentes patogênicos. Logo, não se deve negligenciar os processos de manejo de lodo proveniente de sistemas de tratamento de esgoto para obter-se segurança biológica em seu uso posterior (ALAMINO, 2010).

3.4.5.3 Poluentes orgânicos

A presença de compostos orgânicos perigosos em sistemas de esgotamento sanitário até recentemente era pouco estudado. No Brasil, na maioria dos sistemas de tratamento de efluentes, não possuem planos de monitoramento e metodologias específicas para análises de compostos orgânicos perigosos. As normas brasileiras geralmente adotam regras apenas para metais pesados e agentes patogênicos, o que não garantem a total proteção do meio ambiente (COSTA et al., 2014).

A falta de dados sobre o comportamento físico, químico e biológico destes poluentes orgânicos, e da sua relação com a contaminação de águas, torna-se difícil entender como devem ser tratados e destinar corretamente para não trazer danos ao meio ambiente e a saúde humana. É essencial que haja mais pesquisas sobre tais poluentes, sobre o seu comportamento e desenvolvimento em águas residuais e principalmente no mecanismo de eliminação destes poluentes (COSTA et. al., 2014).

3.5 Manejo do lodo proveniente de ETE

O termo manejo é caracterizado pela execução de algo com as mãos, como por exemplo, o manejo de algum instrumento. Na área das ciências ambientais e do saneamento básico, o manejo é atribuído como desempenho atividades operacionais ou processos de tratamento e disposição de resíduos. Em relação lodo proveniente de ETE, o manejo se enquadra nas operações de limpeza da unidade de bombeamento, tratamento e disposição final desse resíduo (ANDREOLI, 2009).

A estimativa de produção de lodo úmido no Brasil é de aproximadamente 80.000 m³/dia, e o tratamento de lodo de ETE vem recebendo maior expressividade devido aumento de unidades de estações tratamento de efluentes no país. Para atender as novas exigências ambientais é necessário definir quem será o responsável pelo manejo do lodo nas ETE's, porém há uma indecisão entre os órgãos ambientais sobre quem irá assumir a reponsabilidade da gestão, se será a administração pública da localidade ou a própria estação de tratamento de efluentes (ANDREOLI, 2009).

De acordo com Batista (2015), a má gestão do manejo desse resíduo provoca riscos para a saúde humana e ao meio ambiente. Ao estabelecer quais os processos serão realizados nas etapas do tratamento e disposição lodo, o custo é um elemento importante

pois busca-se diminuir os impactos ambientais causados pela disposição inadequada do lodo, sem que haja um aumento de custos sociais e ambientais.

De maneira geral, como já descrito, o lodo muda suas propriedades de acordo com o tratamento de efluente utilizado. O processo de gerenciamento do lodo nas ETE's deve abranger as seguintes etapas e objetivos conforme pode ser observado no Quadro 3 (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2001).

Quadro 3 – Etapas de gerenciamento do lodo.

	Etapas	Objetivo
1	Adensamento	Redução de volume
2	Estabilização	Eliminação da matéria orgânica
3	Condicionamento	Iniciar a desidratação
4	Desaguamento	Eliminação de umidade
5	Higienização	Remoção de agentes patogênicos
6	Disposição Final	Disposição final dos subprodutos gerados

Fonte – Andreoli; Sperling; Fernandes (2014).

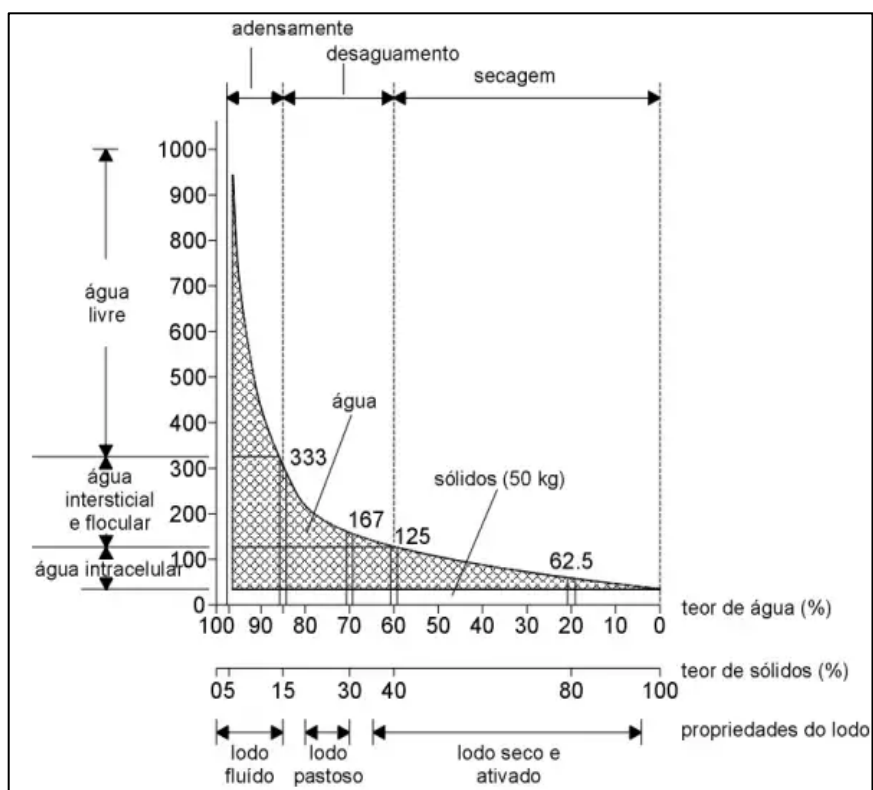
3.5.1 Adensamento

O lodo produzido no decorrer das etapas de estações de tratamento de efluentes de segundo nível retém uma grande parcela de água. O adensamento tem como objetivo diminuir a quantidade de água dos resíduos através de processos físicos. Desta maneira, há uma redução da capacidade volumétrica das próximas etapas do tratamento. Logo, o adensamento beneficia o processo de tratamento, como por exemplo, a redução de consumo de produtos químicos, redução de custo com bombas, menor custo de energia para aquecimento dos digestores. (MIKI; ALÉM SOBRINHO; VAN HAANDEL, 2006).

Dependendo do procedimento de tratamento de esgoto utilizado, a etapa de adensamento pode ou não ser necessária, embora na maioria das vezes, em uma instalação convencional de segundo nível, o lodo produzido contenha uma quantidade significativa de água, como o lodo primário gerado nos decantadores primários e do lodo gerado nos decantadores secundários (SANAPAR; PROSAB, 1999).

Ao observar a Figura 1, nota-se a relação entre o volume e o teor de água no lodo. A proporção de sólidos no teor de água é inversamente proporcional à proporção de água no teor de sólidos, o que implica que uma pequena mudança na umidade resulta em um grande aumento no teor de sólidos e uma redução significativa no volume de lodo (LOUREIRO, 2021).

Figura 1 – Relação entre o volume e o teor de água no lodo



Fonte - SANAPAR; PROSAB (1999).

Os mais comuns tipos de adensamentos são: por gravidade, flotação com ar dissolvido, centrífuga, adensador de esteira, tambor rotativo desaguadoras. As principais características dos tipos de adensamentos estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Relação entre os tipos de adensamento e suas características

Tipo de Adensamento	Características
Adensamento por gravidade	Ocorre geralmente em tanques de sedimentações circulares com braços raspadores de lodo. Ao entrar pela parte superior do tanque o lodo passa pelos processos de sedimentação e compactação. Ao ser adensado o lodo do fundo do tanque é retirado pelos braços raspadores e segue para as próximas etapas do sistema de tratamento.
Adensamento por flotação	Ocorre quando introduz bolhas de ar finamente divididas na fase líquida. Ao entrar em contato com o material particulado, diminui a sua densidade e separa as partículas sólidas da fase líquida.
Adensamento por centrífuga	Recomendado apenas para lodo biológico de descarte. A sedimentação das partículas sólidas do lodo ocorre pelo fluxo da força centrífuga.
Adensamento por esteira	O lodo é adensado pelo processo de compressão e reduz o volume consideravelmente. A retirada do excesso de água ocorre na esteira de drenagem.
Adensamento por tambor rotativo	O lodo é distribuído pelo tambor rotativo e filtrado pelos furos da tela de filtração. Após, são direcionados para calha de drenagem.

Fonte – Miki; Além Sobrinho; Van Haandel (2006).

3.5.2 Estabilização

A estabilização do lodo é uma etapa que engloba processo físicos, químicos e biológicos. É a etapa responsável pela remoção dos maus odores através da remoção da matéria orgânica biodegradável presente no lodo e eliminação de agentes patogênicos (SPERLING; GONÇALVES, 2014).

A estabilização do lodo ocorre devido a dois fatores negativos do lodo bruto que incluem a sua capacidade de produzir odores e microrganismos patogênicos. O nível de estabilização do lodo após a saída de um sistema de tratamento de esgoto depende da tecnologia utilizada. Em sistemas convencionais, o lodo primário é formado pelo tratamento primário, no qual o efluente passa pelo decantador primário, seguido de tanque de aeração e decantador secundário, há a formação de material de sedimentação e altamente instável. E o lodo secundário, também conhecido como lodo ativado, é instável

e necessita passar por processos suplementares de estabilização (FERNANDES; SOUZA, 2001).

De acordo com Luduvic (2014), os processos de estabilização podem ser divididos como:

- ✓ Estabilização biológica: processo de digestão anaeróbia, digestão aeróbia ou compostagem que utilizam bactérias específicas para a remoção da fração biodegradável da matéria orgânica;
- ✓ Estabilização química: o processo atinge a sua eficiência através da oxidação química da matéria orgânica;
- ✓ Estabilização térmica: ocorre através da ação do calor sobre a fração da matéria orgânica biodegradável em recipientes totalmente fechados.
- ✓ Compostagem: processo de decomposição da matéria orgânica através de microrganismo aeróbios mesofílicos e termofílicos.

Entre os tipos de estabilização, as mais usuais são a digestão aeróbia e anaeróbia, já citadas aqui anteriormente, sendo a digestão anaeróbia utilizada em ETE's de porte médio a grande e a digestão aeróbia em ETE's de pequeno porte. Caso haja uma parada inesperada do funcionamento das estações de tratamento, a estabilização química com cal pode ser utilizada como um processo alternativo para a estabilização do lodo (LOREIRO, 2021). No Quadro 5 podem ser observados os tipos de tecnologias de estabilização do lodo e métodos de disposição final.

Quadro 5 – Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final.

Processo de tratamento	Uso ou método de disposição final
Digestão anaeróbia/anaeróbia	Produz biossólido capaz de ser usado na agricultura com algumas restrições. Necessita passar pela etapa de desaguamento e higienização para a sua utilização na agricultura.
Químico (alcalinização)	Uso agrícola ou na cobertura diária de aterros sanitários.
Compostagem	Uso em viveiros, horticultura e paisagismo. Pode ser utilizado após a etapa de desaguamento do lodo.
Secagem térmica	Produto indicado para uso irrestrito em cultivos agrícolas por possuir um alto teor de sólidos, grande concentração de nitrogênio e livre de patógenos.

Fonte: Luduvic (2014).

A digestão anaeróbia é a mais utilizada mundialmente no processo de estabilização do lodo, pois apresenta maiores vantagens do que a digestão aeróbia, como por exemplo, existe a maior redução de coliformes fecais e os produtos formados (dióxido de carbono e metano) não precisa de outras fermentações. Já no processo de digestão aeróbia o lodo precisa passar pelo adensamento antes de ir para a etapa de digestão, outra desvantagem é o alto custo operacional pela necessidade de mais energia para que ocorra a aeração (HAANDEL; SOBRINHO, 2006).

3.5.3 Condicionamento

O condicionamento do lodo é uma etapa que antecede o desaguamento e têm influência direta com a eficiência dos sistemas mecanizados. Essa etapa pode ser executada através de produtos químicos inorgânicos ou orgânicos, e por tratamento térmico. Possui como objetivo facilitar a separação da fase sólida-líquida do lodo, aumentando suas partículas, e as agregando em partículas maiores (GONÇALVES et al., 2014).

O processo de condicionamento consiste em uma fase de coagulação seguida de uma fase de floculação. O objetivo da coagulação é desestruturar as partículas enfraquecendo as forças eletrostáticas que as separam. A floculação permite a acumulação de areia coloidal e de sólidos finos através de pequenos gradientes de agitação (ANDREOLI et al., 2001).

De acordo com Pedroza et al., (2010), o condicionamento químico (uso de produtos orgânicos e inorgânicos) é o processo mais funcional, pois auxilia a redução da umidade do lodo de 90 a 99% para 65 a 80%, a depender dos sólidos presentes no lodo. Os principais produtos utilizados no condicionamento do lodo são os sais metálicos, cal e os polímeros orgânicos. Dentre os produtos inorgânicos mais utilizados são o cloreto férrico e cal (ANDREOLI et al., 2001).

3.5.4 Desaguamento

O objetivo do procedimento de desidratação ou desaguamento é minimizar o volume do lodo e criar um material que se comporte mecanicamente de forma semelhante aos sólidos. Para tal, podem ser utilizados processos naturais ou mecânicos. Os principais mecanismos de remoção de água em sistemas naturais são a evaporação e percolação, enquanto os processos mecânicos contam com mecanismos de filtração, compactação ou centrifugação para acelerar o processo (BATISTA, 2015).

As principais causas para a realização da etapa de desidratação são: Com a redução do volume do lodo produzido, há o menor custo de transporte para o local da disposição final; possui maior eficiência na incineração; e o lodo pode ser utilizado como biossólido na agricultura ou ser disposto em aterros sanitários (METCALF; EDDY, 2002).

A escolha de qual processo de desaguamento a ser adotado irá depender da área disponível e do tipo de lodo produzido. Para ETE's de pequeno e médio porte, localizadas em zonas afastadas de áreas urbanas são indicados processos naturais como o leito de secagem ou lagoas de secagem. Já para ETE's de grande porte, com menor área disponível, utilizam-se processos mecânicos como centrífugas, prensas desaguadoras e filtro-prensa (GONÇALVES et al., 2014).

3.5.4.1 Desaguamento mecânico

A remoção de água durante a dessalinização mecânica é parcial, o produto final tem um teor de sólidos que varia de 15 a 35%, de acordo com as características do lodo e das condições operacionais. A utilização deste método tem causado problemas com a sua disposição final, não somente por sua constituição semissólida, mas também por causa de presença de patógenos (BATISTA, 2015). No Quadro 6 pode-se observar as principais vantagens e desvantagens do processo de desaguamento mecânico.

Quadro 6 – Vantagens e desvantagens de desaguamento mecânico.

Equipamentos	Vantagens	Desvantagens
Centrífugas	Ocupam áreas reduzidas; podem ser utilizadas também para a etapa de adensamento; facilidade de instalação e demandam pouca atenção dos operadores.	Alto consumo de energia; manutenção cuidadosa; produto de importação com preço elevado no Brasil.
Prensas desaguadoras	Baixo custo de aquisição; consumo reduzido de energia elétrica.	Exige do operador uma inspeção visual cuidadosa antes do início de cada ciclo de filtração; ao final de cada turno de trabalho, o equipamento deve ser lavado; e como o equipamento permite a exposição do lodo durante todo o processo, é necessário que o local possua ventilação adequada para minimizar o nível de insalubridade e reduz o risco de elevação de concentração de gás sulfídrico
Filtro prensa	Material com alta concentração de sólidos; alta captura de sólidos; qualidade do efluente líquido; baixo consumo de produtos químicos para condicionamento do lodo	Exige do operador uma inspeção visual cuidadosa antes do início de cada ciclo de filtração; ao final de cada turno de trabalho, o equipamento deve ser lavado.

Fonte: Gonçalves *et al.* (2014).

3.5.4.2 Desaguamento natural

Os processos de desaguamentos naturais ocorrem ao ar livre e demandam uma maior área a disposição do lodo. Os sistemas naturais para a remoção da umidade são divididos em duas categorias: leitos e lagoas de secagem. Os leitos são normalmente unidades retangulares onde ocorre a redução da umidade através da drenagem e a evaporação da água durante o tempo de exposição à secagem. As lagoas, no entanto, possuem o mesmo mecanismo dos leitos de secagem, porém são construídas em dimensões maiores e diferem nos processos de operação (ANDREOLI *et al.*, 2003).

No Quadro 7, pode-se observar as principais vantagens e desvantagens do processo de desaguamento natural para o lodo de efluente.

Quadro 7 – Vantagens e desvantagens dos processos de desaguamento natural.

Secagem	Vantagens	Desvantagens
Leito de secagem	Baixo valor de investimento; baixo ou inexistente consumo de produto químico; material com alto teor de sólidos; simplicidade operacional; exige pouca atenção	Elevada quantidade de água requerida; necessidade de estabilização do lodo; lenta remoção de material seco; necessidade elevada de mão de obra para remoção do material seco; e elevado risco de liberação de odores desagradáveis e proliferação de moscas.
Lagoas de secagem	Baixo consumo de energia; ausência de produtos químicos; estabilização complementar da matéria orgânica; mão de obra pouca especializada; e serve como unidade reserva em ETE's com problemas operacionais no desaguamento do lodo.	Odores de difícil controle; pode poluir lençol freático e águas subterrâneas; atração de vetores; impacto visual; e ausência de critérios racionais de engenharia para estudo econômico.

Fonte: Gonçalves *et al.* (2014).

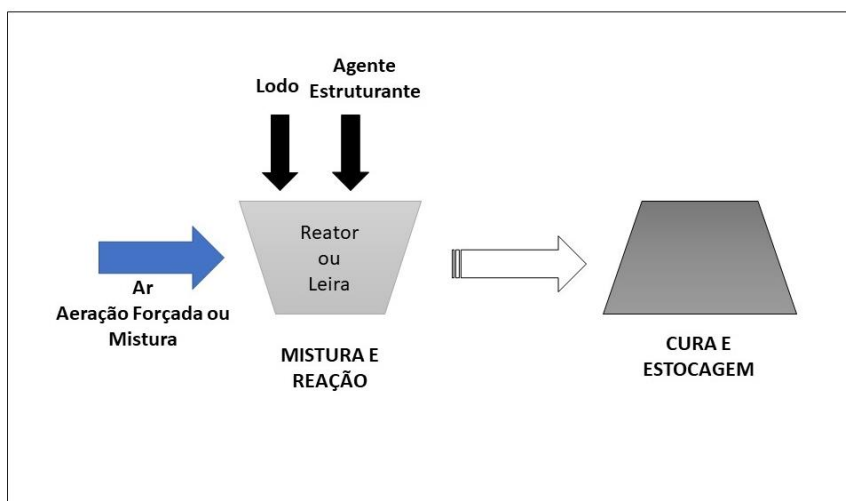
3.5.5 Higienização do lodo produzido em ETE's

O lodo em sua composição é formado por microrganismos, bactérias, fungos, vírus e outros agentes patogênicos causadores de doenças. A maior preocupação na higienização do lodo é conseguir eliminar a maior quantidade de microrganismos patogênicos, devido à alta concentração encontrada em sua composição. O processo de higienização não é de fato uma desinfecção, já nem todos os agentes patogênicos são eliminados nesta etapa, o que ocorre é a minimização dos níveis de patogenicidade para não acarretar danos à saúde pública (PINTO, 2014). Entre os processos de higienização do lodo pode-se destacar: a compostagem, a calagem e o tratamento térmico.

3.5.5.1 Compostagem

A compostagem é definida como o processo de decomposição aeróbia da matéria orgânica que ocorre pelas condições de controle da temperatura, umidade, oxigênio e nutrientes. O produto formado após a este processo pode ser utilizado como condicionador de solos (PINTO, 2014). A Figura 2 mostra um fluxograma do processo de compostagem.

Figura 2 – Fluxograma do processo de compostagem.



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

É necessária a adição de um agente estruturante na mistura com o lodo para que o processo de compostagem possa atingir as condições ambientais, e para obter maiores retenções de umidade, e manter o equilíbrio entre o nitrogênio e o carbono. Entre os agentes estruturantes pode-se citar os seguintes: folhas, resíduos de madeira, serragem, palha de arroz, e entre outros. O processo de compostagem ocorre em três etapas (PINTO, 2014):

- ✓ *Fase Inicial Mesófila*: Ocorre o crescimento de microrganismos mesófilos com o aumento gradual da temperatura;
- ✓ *Fase Termófila*: Ocorre a inibição dos microrganismos patogênicos com o aumento progressivo da temperatura; e aumento das bactérias e fungos.
- ✓ *Fase Final Mesófila*: A atividade bacteriana começa a diminuir com a regressão da temperatura.

3.5.5.2 Calagem

A calagem ou estabilização alcalina é um dos processos de higienização mais utilizados nas ETE's no Brasil, é definida como a adição de cal virgem ou hidratada para a desinfecção do lodo. A redução de agentes patogênicos e dos odores ocorre quando uma quantidade de cal é adicionada no lodo e o pH é aumentado para 12 (PINTO, 2014).

O procedimento de estabilização alcalina pode ser realizado pela adição de cal ao lodo já desidratado, ao lodo cru ou por outras tecnologias. Destas, o método mais comum é adicionar cal ao lodo já desidratado. A utilização de cal virgem é o mais indicado, pois

a sua reação com o lodo desidratado com teor de sólidos entre 25 e 30% pode elevar a temperatura entre 20°C e 50°C, dependendo da dose utilizada, resultar na aceleração da inatividade dos microrganismos patogênicos e ovos. Já a adição de cal ao lodo cru é menos utilizada por demandar utilização de mais equipamentos, como, o filtro de prensas, para evitar maiores desgastes dos equipamentos causadas pela cal. A utilização de outras tecnologias para a higienização do lodo é pouco usual, normalmente são realizadas por patentes industriais, como por exemplo, a agregação de cinzas do lodo em fornos de cimentos sendo o lodo previamente desidratado (JORDÃO; PESSOA, 2005).

Para o que pH da mistura entre o lodo e a cal alcance a ordem 12, doses de cal necessárias irão depender do tipo de lodo, do teor de sólidos e do tipo de tratamento de efluentes adotado (PINTO, 2014). Na Tabela 4 pode-se observar a dosagem de cal para iniciar o processo de higienização e se pH atingiu o valor esperado.

Tabela 4 – Quantidade cal requerida para atingir o pH de ordem 12

Tipo de lodo	Ca(OH)₂ (kg/ton de sólidos secos)	pH final
Lodo primário	54 – 154 (110) *	12,7
Lodo ativado	190 – 350 (270) *	12,6
Lodo anaeróbico	125 – 225 (170) *	12,4

* Valores médios da quantidade de cal aplicada.

Fonte: Pinto (2014).

Para que este tipo de higienização seja eficaz e ocorra a redução de patógenos, é essencial que o tempo de contato seja adequando entre o lodo e a cal. Tal período deve variar entre 30 e 120 dias, dependendo das características do lodo e da dosagem do cal. Caso o pH não esteja em níveis maiores que 12, maiores dosagens de cal devem ser aplicadas para garantir a eficiência da higienização do lodo (SAITO, 2013).

3.5.5.3 Tratamento térmico

A higienização do lodo por tratamento térmico corresponde ao aquecimento do lodo por uma fonte de calor, causando a evaporação da água presente no resíduo e alcançando a inatividade dos organismos patogênicos.

No entanto, para o processo ser economicamente viável o lodo deve passar primeiro pelas etapas de digestão e desidratação até obter uma concentração de sólidos de 20-35%. O lodo seco tem um teor de sólidos de 90-95%. O tratamento térmico pode ocorrer das seguintes formas: 1 – a utilização de secadores de contato direto, ou seja, o calor fica em contato direto com o lodo; 2 – a utilização de secadores de contato indireto, onde o ar quente é passado por placas térmicas. Ambos necessitam de equipamentos para evitar a saída de odores indesejáveis para o meio ambiente (PINTO, 2014).

3.6 Disposição Final

A disposição final dos lodos provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto apresenta-se como uma das fases mais negligenciadas de toda a operação do sistema, por ser uma etapa que pode atingir até 50% do custo operacional de uma operação de sistema de tratamento de efluentes. As alternativas usuais para a destinação e aproveitamento do lodo são diversas, porém a escolha da alternativa mais adequada deve analisar as características do lodo produzido. Entre as alternativas mais habituais as que possuem maior destaque são: disposição em aterros sanitários; incineração; uso agrícola e florestal; recuperação de áreas degradadas; landfarming, reuso do lodo na construção civil; reuso industrial (BETIOL; CAMARGO, 2005).

3.6.1 Disposição em aterros sanitários

De acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) – NBR 8419 aterro sanitário de resíduos urbanos é caracterizado 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, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Para que não haja a contaminação do solo ou de lençóis freáticos pelo lixiviado, líquido produzido em aterros, os quais possuem altas concentrações de contaminantes, entre eles os metais pesados e poluentes orgânicos. A disposição dos lodos geralmente é realizada em valas devidamente imperializadas, que são recobertas com solo e em seguida

compactada. Em geral a degradação do lodo ocorre de maneira lenta por ser um processo anaeróbio, e possui uma produção de gás metano que possui um alto poder calorífico para produção de energia, contudo a queima deste gás é o mais frequente em disposição em aterros sanitários (BATISTA, 2015).

A disposição do lodo em aterros sanitários pode ocorrer em duas mobilidades, sendo: aterros sanitários exclusivos, ou seja, aterros que são construídos de acordo com as características do resíduo, a sua infraestrutura, e levando em consideração dos riscos ambientais. Neste cenário, prefere-se o lodo secos que possui um elevado teor de sólidos (>30%). Outra mobilidade é a codisposição do lodo com resíduos sólidos urbanos, ou seja, o lodo ao ser disposto no solo é mesclado com resíduos sólidos urbanos, o que potencializa a etapa de biodegradação da matéria orgânica decorrente do teor de nitrogênio e do potencial de agentes patogênicos do lodo. Normalmente, as administrações públicas não aceitam lodos em seus aterros, por ter a desvantagem de diminuição da vida útil dos aterros, impossibilita o reaproveitamento do lodo e por torna-se um risco de contaminação da localidade (LUDUVICE; FERNANDES, 2014).

A disposição do lodo em aterros sanitários urbanos é uma alternativa que possui um menor custo de operação, comporta a variedade dos tipos de lodo, e a sua operação não é adicionada uma etapa para o tratamento de lodo, ou seja, a operação ocorre de maneira livre sem considerar as condições adequadas para o manejo do lodo. É a alternativa mais usual no gerenciamento de resíduos dos sistemas de tratamento de efluentes, porém a operação desta alternativa acarreta problemas como o mal odor, maior presença de insetos, pássaros e vetores, e possui baixa efetividade (LOUREIRO, 2021).

3.6.2 Incineração

A incineração é um método térmico realizado em altas temperaturas entre 550°C a 950°C, e tem como objetivo eliminar a matéria orgânica e agentes patogênicos do lodo por meio do processo de combustão. Este processo reduz o lodo seco a cinzas e tem como garantia a redução do volume do lodo. A cinza residual originada pela combustão do resíduo apresenta um percentual baixo a 4% do volume do lodo desaguado presente no incinerador. Além disso, a incineração pode ser considerada como uma etapa do tratamento de esgotos ou uma forma de disposição final (LUDUVICE; FERNANDES, 2014).

É uma alternativa de tratamento bastante eficiente em termos de diminuição do volume do lodo, tornando-o menos tóxico ou atóxico, ou ainda eliminá-lo. Porém, esta alternativa que apresenta alto custo por tonelada de lodo tratado e além de causar problemas como a poluição do ar, e demanda local para descarte final adequado para cinzas pois estas podem causar lixiviação. A incineração do lodo, geralmente é aplicada quando o lodo apresenta níveis altos de metais pesados impossibilita a sua reciclagem agrícola (ANDROELI, 1999). Contudo, agora os incineradores são equipamentos modernos equipados com filtros, o que acarreta a diminuição consideravelmente da emissão de gases como CO, SO₂. Com as emissões controladas a incineração se torna uma opção destinação melhor do que a disposição do lodo sem tratamento em aterros sanitários.

Os incineradores utilizados no tratamento de lodo de esgotos são o de múltiplas câmaras e de leito fluidizado. O incinerador de múltiplas câmaras possui três partes onde ocorre combustões distintas, a parte inferior é onde ocorre o resfriamento do lodo, na parte intermediária é onde ocorre a queima do lodo, e na parte superior ocorre a eliminação final da umidade do resíduo (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014). Já no incinerador de leito fluidizado o processo de combustão ocorre em uma câmara única com paredes resistentes, parcialmente preenchidas com partículas de areia, alumina, carbonato de cálcio etc. Quando o lodo desaguado entra em contato com o leito fluidizado, inicia-se o processo de retenção dos fragmentos orgânicos até completar a combustão (CLAUREN, 2001).

3.6.3 Incineração com obtenção de água potável e cogeração de energia

A incineração do lodo de efluente provoca a eliminação das substâncias orgânicas e agentes patogênicos pela combustão, obtida pelo excesso de oxigênio. Hoje em dia, os incineradores são equipados com sistemas de filtros sofisticados que reduzem consideravelmente a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Dado a grande complexidade do processo e o alto custo de operação, o uso desta alternativa está restrito às grandes áreas que possuem uma maior concentração industrial (LUDUVICE; FERNANDES, 2014).

A busca na geração de recursos a partir dos resíduos gerados por ETE's tem estimulado a adoção de tecnologias, como a incineração, para a produção de energia,

como por exemplo, a cogeração que produz tanto energia elétrica quanto térmica, e a obtenção de água potável. Deste modo, pode-se destacar a empresa norte-americana, Sedron Technologies, composta por engenheiros que possuem o objetivo de melhorar as tecnologias para o saneamento e a gestão de resíduos sólidos.

A Sedron Technologies é responsável pela criação do Janicki Omni Processor (JOP), uma estação de tratamento de resíduos descentralizada compacta, que gera eletricidade, água limpa, calor e um produto de cinzas adequado para o uso com aditivo de solo ou material de construção. É um sistema que recupera recursos do lodo de esgoto, elimina a presença de patógenos, visa tornar o tratamento de resíduos mais acessível e manter a responsabilidade ambiental (SEDRON, 2022).

O processo inicia-se pela combustão dos resíduos sólidos úmidos que entram em um secador onde a umidade é evaporada, após na câmara de combustão os resíduos sólidos secos são queimados e reduzidos a cinzas, que são condicionadas e filtradas para atender as normas para serem reutilizadas como aditivo para o solo ou para construção civil. O vapor gerado na câmara de combustão é transferido para um expensor de vapor que liga um gerador para produzir eletricidade, que alimenta todo o sistema do JOP e a energia excedente pode ser vendida para as concessionárias de energia elétrica. A geração de água potável ocorre quando a evaporação dos resíduos sólidos úmidos é capturada e este vapor é filtrado e condensado para voltar a ser água, com o tratamento adequado essa água pode atingir os padrões de água potável.

3.6.4 Landfarming

O sistema chamado como landfarming é uma tecnologia que tem a capacidade de biodegradação do lodo por meio de microrganismos contidos no perfil do solo e na retenção de metais na sua camada superficial. O solo é utilizado como um sistema de tratamento do lodo, pois auxilia na atividade biológica e a sua exposição ao sol causa a degradação das substâncias orgânicas. É uma técnica utilizada quando não existe a possibilidade de utilização dos nutrientes advindos do lodo, apenas a decomposição da matéria orgânica, possui menor custo para instalação, é inofensiva ao meio ambiente e é uma alternativa para emergências (ANDROEOLI et al. 1999).

A aplicação dos lodos gerados em sistema de tratamento biológico de esgotos sanitários, pode ser executada desde que exista um benefício agrônomo em áreas destinadas à agricultura, à produção florestal ou à pecuária; em áreas reservadas à recuperação ambiental por meio do processo de revegetação (LARA; ANDREOLI; PEGORINI, 2014).

As áreas que não possuem impermeabilização do solo as aplicações de doses de lodo no solo estão entre 60-70 toneladas/ano. Já áreas que em que a operação é executada dentro da metodologia de landfarming, como a impermeabilização e compactação do solo de 60-80 cm de profundidade, colocação de drenos, coletar os percolados e depois tratá-los, aumentam a taxa de aplicações do lodo variam entre 300-600 toneladas/ano/ha (ANDROEOLI et al. 1999).

3.6.5 Uso benéfico do lodo na agricultura

O biossólido em sua composição possui uma grande quantidade de nutrientes que são essenciais para o crescimento de plantas. Porém, a presença de tais nutrientes no lodo depende do efluente de origem e do sistema de tratamento adotado. Em maior concentração são encontrados nitrogênio e o fósforo. O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) são encontrados em porções menores, mas quando há a higienização do biossólido por caleação, onde são adicionados grandes quantidade de Ca e Mg, as proporções encontradas destes nutrientes são maiores (ANDREOLI, PEGORINI, FERNANDES, 2014).

O uso do biossólido como fertilizante em regiões agrícolas vem tornando-se uma destinação final de baixo custo e com um impacto ambiental positivo. É uma opção que vem crescendo ao redor do mundo, mas infelizmente no Brasil é pouco utilizada. Algumas pesquisas já estão sendo realizadas no país, e apresentaram resultados positivos na utilização do biossólido como fertilizante, como, por exemplo, a pesquisa de Silva, Resck e Sharma (2000), na qual demonstram o cultivo do milho através do fornecimento do lodo pela Companhia de Saneamento do Distrito Federal e o mesmo possui potencial para substituir o uso de fertilizantes químicos nas plantações.

De acordo com o CONAMA 498/2020, a utilização do lodo na agricultura deve conter concentrações máximas de substâncias inorgânicas denominados como metais pesados, pois grandes quantidades destes metais pesados podem provocar danos na saúde pública e ao meio ambiente. E proíbe a utilização de qualquer uma das classes de lodo em

cultivos onde a parte comestível entre em contato com o solo. Na Tabela 5 pode-se observar as concentrações máximas de metais pesados permitidas no uso do lodo como insumo agrícola.

Tabela 5 – Concentração máxima permitida no lodo de efluente ou produto derivado – substâncias inorgânicas.

Substâncias inorgânicas	Concentração máxima permitida (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Crômio	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: CONAMA 498 (2020).

Vale salientar que a concentração dos nutrientes no biossólido pode não ser o suficiente para o desenvolvimento das plantas, sendo necessário adicionar fertilizantes químicos ou orgânicos, de acordo com as necessidades de nutrição do plantio. Os nutrientes que geralmente faltam no biossólido são o fósforo, pois há a exigência de grandes quantidades, e o potássio devido a sua baixa concentração no biossólido (ANDREOLI, PEGORINI, FERNANDES, 2014).

A escolha da alternativa de disposição final do lodo de efluentes para uso agrícola precisa ser avaliada de forma técnica, econômica e ambiental. Os impactos ao meio ambiente podem ser controlados, dependendo do sistema de tratamento de efluentes, da sua eficiência de operação, do manejo dos seus subprodutos, e também da obediência as normas e resoluções definidas (LARA, ANDREOLI, PEGORINI, 2014).

3.6.6 Uso do lodo para 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 ocorre devido as ações antrópicas, como atividades de mineração, construções de rodovias e barragens, urbanização, fora a exploração agropecuária (MENDES, 2012). Já a recuperação é definida como o ato de reconstrução de uma área degradada para uma área não-degradada, recuperando todas as suas características físicas, químicas e biológicas, e a sua capacidade de contribuição para a produção de bens de consumo ou em prestação de serviços ambientais (LOUREIRO, 2021).

A utilização de lodo de efluente doméstico na recuperação de áreas degradadas possui resultados positivos na reconstituição da flora e do solo, pois são áreas que possuem um alto déficit de matéria orgânica e nutrientes. O lodo quando aplicado em grande quantidade, consegue aumentar a capacidade do solo de infiltração, retenção de água e aeração por um longo período (CHAGAS, 2000).

A quantidade de lodo a ser aplicada vai variar de acordo a composição química do lodo, no entanto as taxas de aplicações do lodo neste tipo de destinação geralmente são elevadas, o que pode ocasionar na contribuição de substâncias indesejáveis para a recuperação do solo. O solo a ser recuperado encontra-se fisicamente desestruturado, e exposto às variações climáticas, e a sua mistura com o lodo pode elevar os riscos de erosão e lixiviação. Portanto, a escolha do local a ser recuperado demanda maiores cuidados para evitar processos erosivos devido as altas taxas de aplicação do lodo no solo (LARA, ANDREOLI, PEGORINI, 2014).

Apesar das vantagens deste tipo de destinação final do lodo como insumo para a recuperação de solos degradados, necessita-se de novas pesquisas que analisem as reações químicas entre o lodo e o solo, e estudem os impactos causados com essa mistura, como por exemplo, a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e os riscos de erosão e lixiviação do solo. Tais pesquisas irão auxiliar o entendimento da aplicação deste substrato de forma segura e benéfica.

3.6.7 Uso do lodo para reflorestamento

A utilização do biossólido em plantações florestais é uma alternativa favorável para produção de madeira o que não prejudicaria a cadeia alimentar humana (POGGIANI; SILVA; GUEDES, 2006). A aplicação do biossólido em plantações florestais possui a vantagem de possuir menores critérios para a sua utilização do que o uso do lodo em atividades agrícolas. Entre as vantagens deste tipo de disposição final pode-se destacar as seguintes (Hart et al., 1988):

- ✓ Como citado acima, o lodo não entra em contato com a cadeia alimentar humana pois os produtos gerados não são comestíveis;
- ✓ Os ciclos nas culturas florestais são longos e a concentração do lodo no solo possibilita a eliminação de possíveis elementos perigosos no solo;
- ✓ Possui melhor aproveitamento de nutrientes, já que o lodo libera lentamente seus nutrientes e as plantações florestais possuem ciclos longos o que favorece a absorção de nutrientes e a minimização de perdas por lixiviação.

3.6.8 Uso do lodo na produção de substrato vegetal

O substrato é uma mistura de elementos utilizados no crescimento das plantas, fornece as condições químicas e físicas necessárias para a germinação das sementes e o crescimento das plantas. E os principais elementos para essa mistura são: terras de subsolo, esterco, casca de arroz, compostos e minerais como a vermiculita e fertilizantes químicos. Deve-se obter um conhecimento das propriedades químicas e físicas sobre a composição do substrato a ser utilizado, para entender como as sementes e mudas vão se comportar e qual a dosagem necessária (ANDREOLI, 2006).

De acordo com Androeli (2004), um substrato adequado para o desenvolvimento de plantas deve apresentar as principais características: alta capacidade de retenção de água; alta capacidade de retenção de nutrientes; boa capacidade de tamponamento contra as alterações do pH e possuir a ausência de pragas, agentes patogênicos e substâncias inibidoras de crescimento.

3.6.9 Uso benéfico do lodo da construção civil

O uso do lodo na construção civil reduz os gastos associados a matéria-prima que normalmente é utilizada, beneficia o meio ambiente ao dar uma finalidade aos resíduos e

reduz o risco de contaminação dos recursos naturais. As indústrias de cerâmicas e de fabricação de concreto têm grande potencial de utilização de lodo de efluente, pois as composições de seus produtos são menos rigorosas (BATISTA, 2015).

Os resíduos de efluentes estão sendo aproveitados na fabricação de produtos cerâmicos como tijolos, lajotas e telhas, e mostra-se ser uma alternativa viável para a destinação final do lodo. A principal forma de utilização do lodo é a agregação ao processo de preparação da massa cerâmica, o que auxilia na correção da opacidade (ANDREOLI, 2006).

O aproveitamento do lodo de efluente vem se tornando uma atividade promissora na produção de novos materiais no setor da construção civil. Entre as vantagens deste tipo de disposição final pode-se destacar: redução da quantidade de água; produção de tijolos mais leves resultando menores gastos com transporte, possui melhor rendimento operacional por causa do poder calorífico do lodo e a reutilização da energia térmica da queima de gases para a secagem (TSUTIYA, 2000).

3.7 Análise de Multicritério

Para este trabalho será utilizada a análise de multicritério para a escolha da alternativa mais adequada para a disposição final do lodo produzido da Estação de Tratamento de Efluentes da cidade de Itabaiana – SE. A análise de multicritério é uma técnica quali-quantitativa que auxilia na decisão com base em critérios determinados pelos agentes decisores, os quais definem a importância dos critérios em um processo interativo entre aspectos sócios-econômicos (JANNUZZI; MIRANDA; SILVA, 2009).

O principal objetivo de uma análise de multicritério é permitir que as escolhas estejam alinhadas aos seus interesses entre os diversos critérios. A aplicação do procedimento de análise quantitativa de multicritério segue depois que o problema foi claramente definido e as alternativas para sua solução foram listadas. Para que o grupo de tomadores de decisão definam as alternativas e critérios, as seguintes orientações devem ser seguidas: detalhar a questão a ser resolvida; escolher o melhor projeto; identificar as alternativas válidas para solucionar o problema; definir critérios e pesos para a avaliação de alternativas; e atribuir valores para cada critério de avaliação (JANNUZZI; MIRANDA; SILVA, 2009).

4. METODOLOGIA

Para realizar o estudo sobre a disposição final do lodo de ETE, adotou-se a técnica quali-quantitativa de acordo com os objetivos definidos, ou seja, analisar os critérios para a definição de alternativas de disposição final do lodo de efluente sanitário gerados pela ETE localizada no município de Itabaiana – SE.

Inicialmente, foi realizado um levantamento teórico no qual concentrou-se nos conhecimentos teóricos de vários autores nacionais e internacionais que desenvolveram pesquisas e publicações como dissertações, teses, monografias, revistas técnicas, artigos científicos e livros sobre o tema do trabalho. Para a coleta de dados foi feito um estudo aplicado ao lodo produzido da ETE de Itabaiana – SE, a qual recebe apenas efluentes domésticos.

O estudo em questão foi dividido em 5 (cinco) etapas, iniciando com o levantamento de referencial teórico, o cálculo da estimativa de produção de lodo, definição dos critérios e os pesos atribuídos, indicação de alternativas para a disposição final do lodo de acordo com a realidade da ETE em estudo e a construção de uma matriz de resultados. O fluxograma com as etapas deste trabalho pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma das etapas de realizações do trabalho.



Fonte: A autora (2022)

4.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a zona urbana do município de Itabaiana localizado no estado de Sergipe. O município localiza-se a uma latitude $10^{\circ}41'06''$ Sul e a uma longitude $37^{\circ}25'31''$ Oeste, e ocupa uma área de $337,3 \text{ km}^2$. A densidade demográfica é de $258,3 \text{ hab./km}^2$, a cidade é vizinha aos municípios de Campo do Brito, Macambira e Malhador. Situa-se a 56 km de Aracaju e o principal acesso é BR-235. A Figura 4 mostra a localização do município de Itabaiana.

Segundo a Lei 13.004-14, o município de Itabaiana foi declarado como a Capital nacional do caminhão. É uma das características mais expressivas do município pois possui a maior frota de caminhões emplacados em território brasileiro, chegando aproximadamente a cinco mil ou um caminhão para cada grupo de trinta habitantes (SANTOS, 2014).

Figura 4 – Mapa de localização do município de Itabaiana – SE

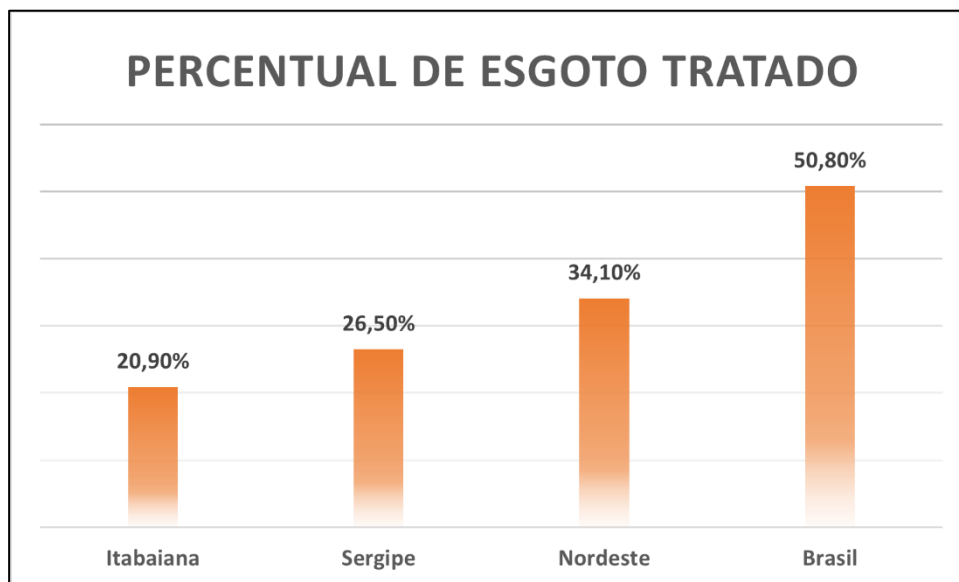


Fonte: Santos, 2014.

A cidade apresenta apenas 39,9 % de Índice de atendimento urbano de esgoto, este índice compreende apenas a zona central urbana do município, ou seja, 60,1 % dos habitantes não são atendidos pela rede coletora de esgoto (BRASIL, 2020).

A porcentagem de esgoto tratado relacionado ao consumo de água nos dá uma visão mais abrangente da condição do município, pois apresenta o percentual de esgoto tratado em relação ao esgoto produzido. Sendo assim, o município apresenta um volume de água consumida de 4.353 mil m³ e apenas 910 mil m³ de esgoto tratado, ou seja, apenas 20,9% de esgoto é tratado, estando abaixo da média nacional de 50,8%, como pode ser visto na Figura 5 (BRASIL, 2020).

Figura 5 – Comparação entre os índices de esgoto tratado em relação ao consumo de água.



Fonte: Adaptada de BRASIL (2020).

O sistema de esgotamento sanitário do município é de responsabilidade da Companhia de Saneamento de Sergipe. O sistema é composto por unidade de coleta e transporte, como rede coletoras, coletores troncos e ramais prediais, e por estações elevatórias e emissários até a Estação de Tratamento – ETE Itabaiana. A rede coletora tem uma extensão aproximada de 155 km, o abastecimento de água é contínuo, 7 dias por semana durante 24 horas e adotou-se o consumo per-capita de água de 150 l/hab. dia, valor compatível com as cidades do Nordeste com população entre 50.000 e 100.000 habitantes.

Em Itabaiana, a Lei Municipal nº1.870/2015, aprova o Plano Municipal de Água e Esgoto do Município de Itabaiana/Sergipe – PMAE, assegura para todo o território de Itabaiana, acesso ao esgotamento sanitário a todos os ocupantes, permanentes ou eventuais, de domicílios, locais de trabalho e de convivência social. O PMAE terá como diretriz projetos e programas específicos para o esgotamento sanitário, tendo como objetivo a universalização dos serviços de saneamento e controle dos impactos ambientais (ITABAIANA, 2015, Art. 1, § 3º, Art. 3).

O projeto do sistema de esgotamento sanitário teve início no ano 2015, no qual foram previstos os seguintes índices de esgotamento sanitário no município: 80% para o centro e 60% para as zonas periféricas. A previsão da Companhia de Saneamento de Sergipe é de aumentar o índice para 100% para todo o território do município de Itabaiana. O sistema de tratamento de efluentes é composto por o pré-tratamento, tratamento primário e secundário, e por fim a desinfecção.

4.2 Estudo de caso – ETE Itabaiana/SE

O sistema de tratamento de efluentes estudado é responsável pela coleta, transporte e tratamento de efluentes residenciais, efluentes industriais e as pluviais não são de responsabilidade da Companhia de Saneamento de Sergipe.

O sistema de tratamento adotado para a operação da ETE é composto pelas seguintes etapas: tratamento preliminar (gradeamento, desarenador), tratamento primário (Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente – DAFA), tratamento secundário (reator de lodos ativados, decantadores secundários) e desinfecção por cloro.

4.1.1 Tratamento Preliminar

Essa fase, é composta por processos físicos, que envolve a retirada de materiais grosseiros e a retenção de areias, tendo como objetivo principal a proteção dos equipamentos de transporte e tratamento de efluentes (LOREIRO, 2021). A fase do tratamento preliminar é constituída por um tanque de alvenaria estrutural composta por grades médias mecanizadas em conjunto com os desarenadores. As grades têm como principal objetivo a retenção de materiais grosseiros como plásticos, roupas, objetos, restos de comida etc.

Os desarenadores são caixas de areia mecanizadas que tem a função de separação de partículas sólidas como a areia, que é transportada por líquidos em escoamento. Para a proteção dos equipamentos do sistema de tratamento deve-se remover partículas de até 0,15 mm. Este processo ocorre devido ao movimento da ponte removedora que direciona a mistura de areia-água ao classificador, possibilitando a remoção de areia em porções úmidas. Em seguida na desarenação, os efluentes são direcionados até a Estação Elevatória de Efluentes Desarenados, local onde os efluentes são bombeados para o DAFA's.

4.2.3 Tratamento Primário – Fase Anaeróbia

Nesta etapa ocorre processo físicos e biológicos, a digestão anaeróbia causa a degradação da matéria orgânica pela sua conversão em metano. Foram instalados 02 (dois) DAFA's com o tempo de detenção hidráulica é de no mínimo de 8,5 horas. A eficiência do tratamento proposto de acordo com as dimensões e as condições climáticas favoráveis, a remoção de DQO será de 68% com o tempo de permanência de 8,5 h, chegando a 75% de DBO em qualquer hora.

4.2.4 Tratamento Secundário – Fase Aeróbia

O tratamento na fase aeróbia ocorre pela presença de microrganismos aeróbios que foram desenvolvidos em resposta ao fornecimento de oxigênio disponibilizado por um sistema de aeração forçada ou prolongada por um aerador. A velocidade do fluxo de ar é mantida constante em uma melhoria do processo bacteriano, e os sólidos são retidos em suspensão através de um caminho de fluxo de ar horizontal (LOREIRO, 2021).

O tratamento anterior (DAFA's) garante a redução de 75% da matéria orgânica, e ao passar para o tanque de aeração (fase aeróbia) são estabelecidas as dimensões de acordo com a relação alimentação/microrganismos (A/M). Esta fase ocorre com a aeração forçada de fluxo descendente, é composta por dois tanques retangulares (circuito orbital), com o período de residência de 5,4 horas.

4.2.5 Decantadores secundários

Após a passagem pelo tanque de aeração, os efluentes são direcionados para os decantadores secundários em formato circular, para sofrerem o processo de decantação, que tem como objetivo separar os sólidos/líquidos (lodo ativado/efluentes tratados), ou seja, o efluente tratado é conduzido para a desinfecção e, posteriormente, ao corpo receptor. E os sólidos, denominados como lodos ativados são direcionados através de uma estação elevatória para o tratamento antes do descarte final.

4.2.6 Desinfecção por hipoclorito de cloro

Inicialmente, a desinfecção do efluente tratado iria ocorrer por desinfecção ultravioleta. Porém, este processo não foi ativado na ETE e a desinfecção do efluente tratado passou a ser pela adição de hipoclorito de cloro. Esta é a etapa final antes do descarte do efluente tratado, ela ocorre em um tanque de plástico instalado numa alvenaria estrutural ao lado do decantador secundário.

Neste tanque, a desinfecção ocorre através da reposição manual de pastilhas de cloro, infelizmente não foi informado a concentração e quantidade de cloro, e o seu tempo de detenção, pois esta etapa de desinfecção por cloro não foi projetada no memorial descritivo. Por fim, a finalidade desta etapa é eliminar poluentes residuais nos efluentes, antes da descarga no corpo receptor. Logo, o efluente é direcionado para o riacho Marcela, localizado próximo ao empreendimento.

4.2.7 Destinação do lodo da ETE

O tratamento da fase sólida ocorre através do desaguamento e destinação final do lodo retirado dos DAFA's (lodo primário) e dos decantadores (lodo ativado). De acordo com os projetistas da ETE, a quantidade de lodo a ser gerada é de 1.881 kg/dia. Esta fase possui duas unidades de operação que são os adensadores de lodo e leitos de secagem. O adensamento do lodo tem a função de adensar o lodo do DAFA's e o lodo ativado, preparando-os para serem direcionados para os leitos de secagem, foram implantados dois adensadores de lodos com funcionamento contínuo. O lodo adensado possui menos de

5% de sólidos, é transferido para o leito de secagem por uma bomba e é distribuído nos leitos de secagem.

O memorial descritivo da ETE – Itabaiana/SE não dispõe informações sobre o manejo do lodo após ser disposto nos leitos de secagem. O que pode ser observado em visitas técnicas a ETE, é que o manejo do lodo ocorre através da limpeza dos leitos de secagem quando todos estão ocupados, mas, os operadores não souberam informar qual intervalo de tempo que isto ocorre. A retirada do lodo dos leitos de secagem devia ocorrer com um auxílio de um caminhão limpa fossa credenciado pela Companhia de Saneamento de Sergipe, e ser encaminhado para a ETE localizada no município de Nossa Senhora do Socorro – SE, onde o lodo seria desidratado e após enviado para aterro sanitário.

Contudo, a gerência da Companhia de Saneamento de Sergipe responsável pela coleta e tratamento dos efluentes do município de Itabaiana – SE, realiza a limpeza dos leitos de secagem através da raspagem do lodo seco pelos operadores da ETE, e os quais são misturados com cal para a eliminação de patógenos presentes no lodo, e são armazenados nas áreas da ETE em sacos grandes ou são dispostos em lonas para evitar o contato direto com o solo. Por isso, este estudo sobre alternativas de disposição final do lodo foi realizado para indicar opções baratas e sustentáveis para este resíduo que se encontra sem uso na ETE.

4.3 Estimativa de produção de lodo na ETE

Para o cálculo da estimativa da produção de lodo da estação de tratamento de efluente, a quantidade será expressa em termos per capita e em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO). No processo biológico do tratamento de efluente, parte da DQO é transformada em biomassa, que vem a compor o lodo biológico. No processo de lodos ativados com a aeração prolongada, como ocorre na ETE – Itabaiana, a cada kg de DQO afluente resulta na produção de 0,50 a 0,55 kg de sólidos suspensos (0,50 a 0,55 kgSS/kgDQO afluente) e considera-se que cada habitante contribui 100 g DQO/dia (0,1 kgDQO/hab. d) (SPERLING; GONÇALVES, 2014).

De acordo com a literatura, o lodo na sua fase líquida gerado a partir da digestão anaeróbia apresenta a massa entre 0,012 e 0,018 kgSS/hab. dia, e um volume entre 0,3 e 0,6 L/hab. dia (SPERLING; GONÇALVES, 2014). Desta forma, pode-se adotar os valores per-capita médio da massa de lodo, e calcular a quantidade de lodo de origem

anaeróbia de acordo com a população esgotável.

$$P.lodo\ anaeróbio = massa\ de\ lodo\ (diária) \times n^{\circ}\ de\ habitantes \times tempo$$

Após a passagem do efluente pela digestão anaeróbia, é necessário calcular a eficiência da remoção de sólidos suspensos (SS) na fase de tratamento anaeróbio onde ocorre a redução de 68% da DQO num tempo de detenção de 8,5 h, ou seja, resulta também na redução dos sólidos suspensos.

O lodo da fase aeróbia gerado a partir da combinação de digestor anaeróbio e aeração por lodos ativados, apresentam massa entre 0,08 e 0,014 kgSS/hab. dia, e um volume de lodo entre 0,2 e 0,5 L/hab. dia (SPERLING; GONÇALVES, 2014).

Desta forma, pode-se adotar os valores per-capita médio da massa de lodo, e calcular a quantidade de lodo de origem aeróbia de acordo com a população esgotável, aplicando a Equação (1).

$$P.lodo\ aeróbio = m.de\ lodo\ (diária) \times n^{\circ}\ de\ hab. \times t(dias) \times (1 - E) \quad (1)$$

Como o sistema de tratamento de efluentes do município de Itabaiana é um sistema combinado, de tratamento primário (DAFA's) com tratamento secundário (lodos ativados), o lodo gerado será do tipo misto, logo, a sua composição será de acordo com as características do efluente e do tipo de tratamento adotado. E a sua produção total de lodo pode ser obtida pela Equação 3.

$$P.\ total\ de\ lodo = P.lodo\ anaeróbio + P.lodo\ aeróbio \quad (2)$$

Como, a ETE – Itabaiana adotou o desaguamento do lodo em leitos de secagem e realiza a sua desidratação, é necessário estimar além a produção de volume do lodo em sua fase líquida como o volume do lodo seco. Foram adotados valores encontrados na literatura como, a densidade do lodo 1000 kg/m³, e concentração de sólidos em lodo líquido de 4% e em lodo seco de 25%. O volume pode ser obtido pela Equação (3).

$$V = (P. total de lodo)/(\rho \times C) \quad (3)$$

Onde:

V= volume (m³)

ρ = densidade do lodo = 1000 kg/m³

C = Concentração de sólidos (%)

Os valores adotados para estimar a quantidade de lodo produzido pelo sistema de esgotamento sanitário do município de Itabaiana foram encontrados na literatura conforme pode ser visto no Quadro 8.

Quadro 8 – Dados para a estimativa da produção de lodo.

Dados para estimativa	Valores adotados
Produção do lodo – fase anaeróbia	0,015 kgSS/hab. dia
Produção do lodo – fase aeróbia	0,011 kgSS/hab. dia
População esgotável*	110.651 habitantes
Concentração de sólidos (fase líquida)	4 %
Concentração de sólidos (fase sólida)	25%
Período de remoção	A cada 3 meses

*População esgotável foi retirada no memorial descritivo.

Fonte: A autora (2022).

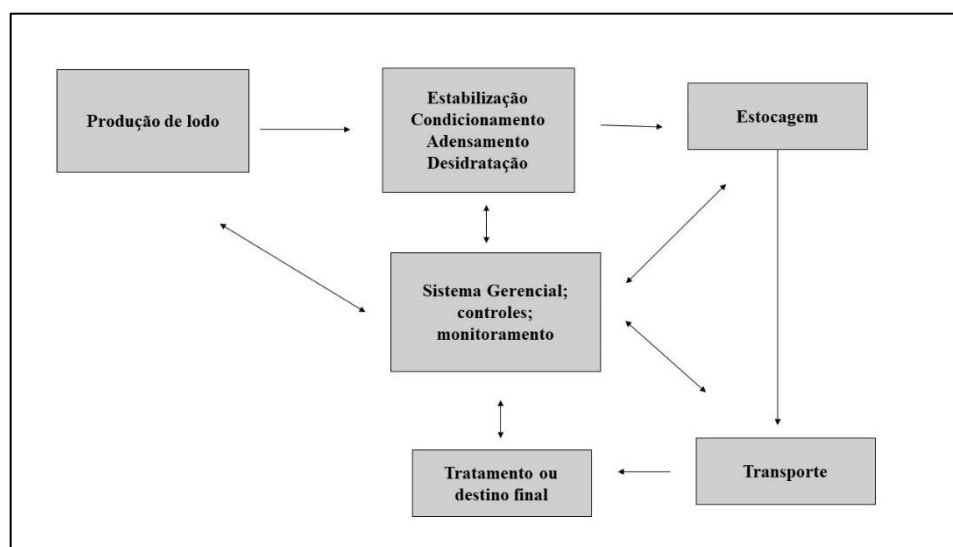
Como no memorial descritivo do sistema de esgotamento sanitário não dispõe de informações sobre o período de remoção do lodo seco nos leitos de secagem, foi adotado um período de 3 meses já que o sistema é de grande porte. E a estimativa da produção do lodo considerou as concentrações na fase líquida do lodo, e por fim estimar a quantidade de lodo seco que poderá ser reaproveitado.

4.4 Avaliação e definição de critérios e pesos para as alternativas

A avaliação de alternativas para a disposição final do lodo de efluentes engloba critérios econômicos, técnicos, ambientais e legais que normalmente são negligenciadas na concepção dos sistemas de esgotamento sanitário. O custo de operação do tratamento e destinação do lodo é alto, entre 20 e 60% dos custos totais da ETE, contudo, deve-se fazer parte do projeto para evitar impactos ambientais que poderão comprometer o desempenho do sistema de coleta e tratamento de esgoto (FERNANDES et al. 2014).

Com a definição da alternativa a ser utilizada, a ETE precisa apresentar uma estrutura física e estrutural compatível com todas as etapas de gerenciamento do lodo (Figura 6), pode ser observado na ETE – Itabaiana que o lodo passa pelas etapas de manejo do lodo e após a desinfecção o lodo é estocado nas áreas comuns da ETE e possui toda a estrutura para encaminhar o lodo seco para disposição final adequada.

Figura 6 - Fluxograma básico para o gerenciamento do tratamento e destino final do lodo de efluente



Fonte: Fernandes *et al.* (2014).

Como a Estação de Tratamento de Efluentes estudada não possui informações sobre o destino final do lodo integrada ao projeto, serão analisados neste trabalho os seguintes critérios: econômico, ambiental, legal, técnico, social. Para alinhar os benefícios das alternativas com o uso do lodo para fins sustentáveis. Os critérios de avaliações foram

analisados e classificados de acordo com as condições locais, e cada alternativa recebeu uma nota de 1 a 5 de acordo com os critérios e subcritérios a serem analisados.

Para a avaliação dos critérios e subcritérios, foram consideradas as principais alternativas de disposição final do lodo encontradas na literatura, o que permitiu um levantamento de informações mais ricas sobre a pesquisa deste trabalho, servindo como base para a melhor escolha da alternativa para disposição final do lodo. As alternativas consideradas foram: incineração, aterro sanitário, *landfarming*, recuperação de área degradada e reciclagem agrícola conforme ordenado no Quadro 9.

Quadro 9 – Alternativas analisadas para a disposição final do lodo da ETE - Itabaiana.

	Alternativa
1	Incineração
2	Aterro Sanitário
3	<i>Landfarming</i>
4	Recuperação de área degradada
5	Reciclagem agrícola

Fonte: A autora (2022).

A disposição final do lodo de efluente é uma das preocupações na gestão adequada de resíduos sólidos. A Agenda 21, é um plano de ações globais no qual diversos países se comprometem a minimizar os problemas socioambientais existentes, e em relação a gestão de resíduos sólidos, buscam seguir os seguintes princípios: buscar meios para a minimização da produção, maximização do reuso e reciclagem e estimular a disposição e tratamento adequado para o lodo (LARA; ANDREOLI; PEGORINI, 2014).

Neste sentido, a avaliação de alternativas para a disposição final do lodo de efluente deve garantir segurança à saúde pública e ao meio ambiente, buscando controlar os impactos ambientais negativos e valorizar os impactos positivos. Neste trabalho, são apresentadas alternativas mais comuns para a disposição final do lodo de efluente, avaliando riscos de cada prática e considerando os aspectos econômicos, sociais, técnicos e ambientais de cada alternativa.

Então, foram definidos 5 (cinco) critérios que caracterizam os principais pontos que auxiliam a tomada de decisão para a escolha da alternativa para a reutilização do lodo de efluente na cidade de Itabaiana. Loureiro (2021), realizou um estudo sobre a avaliação de critérios para destinação final do lodo de esgoto sanitário de uma ETE condominial da cidade de Manaus (AM) e usou critérios semelhantes aos deste trabalho. Vale ressaltar que os critérios escolhidos foram considerados em função das características do empreendimento em estudo e pode variar em casos diferentes.

4.4.1 Critérios econômicos

Apesar do lodo de efluente representar apenas 1% a 2% da produção de efluente tratado, o seu gerenciamento normalmente possui um custo alto entre de 20% a 60% do total dos gastos de toda a operação da ETE (SPERLING; ANDREOLI, 2014). Portanto, este critério econômico é de grande valia na análise de implantação de alternativas de disposição final do lodo. Os custos devem ser divididos entre os custos de implantação, operação e manutenção, ou seja, todo custo relacionado ao manejo do lodo na ETE, no transporte e na disposição final.

Como a ETE – Itabaiana já se encontra implantada e em funcionamento, deve ser incluído na avaliação econômica custos relacionados a necessidade de novas construções ou adaptações de estruturas já existentes. Para poder comparar cada alternativa e auxiliar no entendimento dos custos, foram definidos dois subcritérios: custos de implantação e custos de operação e manutenção. Estes subcritérios devem ser considerados para a estruturar os aspectos econômicos relacionados ao gerenciamento e operação das alternativas propostas, e os itens a serem considerados na composição dos custos de implantação (Quadro 10), operação e manutenção (Quadro 11) podem ser observados abaixo.

Quadro 10 – Itens para avaliação dos custos de implantação.

Custo de implantação	
Áreas necessárias	Para construção de pátios de estocagem ou compostagem.
Equipamentos	Equipamentos a serem utilizados, como equipamentos de adensamento e desidratação do lodo e equipamentos de misturadores de cal.
Material de manuseio	Bombas, esteiras, tratores e caminhões para movimentação do lodo na ETE.
Obras civis	Instalações de equipamentos, laboratórios.
Instalações elétricas	Alguns tipos de tratamento do lodo demandam energia elétrica.
Diversos	Gastos com imprevistos.

Fonte: Fernandes *et al.*, 2014.

Quadro 11 – Itens para avaliação dos custos de operação e manutenção.

Custos operacionais e manutenção	
Manutenção de equipamentos	Este item vai depender do manuseio do equipamento pelos operadores.
Transporte e manuseio	Este custo tem alto impacto, e algumas das alternativas produzem lodo seco com diferentes tipos de concentrações de sólidos.
Matérias primas	Custo de todos os produtos químicos utilizados para desidratação e tratamento do lodo.
Gestão e controle	Custo de análises físico-químicas e microbiológicas.
Mão de obra	Custo do total de empregados e seu grau de qualificação.
Energia	Custo total da energia utilizada pelos processos da ETE.

Fonte: Fernandes *et al.*, 2014.

Como a implantação de um sistema de gerenciamento de lodo em ETE's possui um custo elevado, foi adotado o peso máximo de 10 (dez) pois são critérios essenciais e limitantes para a execução de qualquer alternativa para a disposição final do lodo de efluentes.

4.4.2 Critérios ambientais

De acordo com o CONAMA 001/86, o impacto ambiental é caracterizado como qualquer tipo de alteração no meio ambiente, de origem, direta ou indireta, a partir de atividade antrópicas, e que afeta a saúde, a segurança e o bem-estar da sociedade; e as condições de vida e dos recursos ambientais. Sendo importante ressaltar que os impactos podem ser positivos ou negativos, ou seja, podem ser benéficos ou não para alternativa adotada.

O planejamento adequado de um sistema de tratamento e gerenciamento de lodo de ETE's, deve considerar as alternativas de disposição final de acordo com a política sustentável, tendo em vista os seguintes objetivos: a redução da produção do lodo, utilizando tecnologias de tratamento de efluentes que produza uma menor quantidade de lodo; produzir lodo de qualidade, estabelecer critérios para recebimento de efluentes recebido não esteja contaminado com metais pesados, garantindo assim o seu reuso para fins agrícolas; e reciclar o máximo do lodo gerado (FERNANDES *et al.* 2014).

Ainda para Fernandes et al. (2014), as práticas de disposição final do lodo através da incineração, landfarming ou disposição em aterros sanitários deve ser utilizada apenas quando o lodo não possui valor econômico por apresentar contaminantes na sua composição. Em geral as alternativas mais utilizadas, é a reciclagem do lodo para fins agrícolas, recuperação de áreas degradadas, silviculturas e pastagens.

Portanto, para a construção da matriz de decisões o critério ambiental foi subdividido em três subcritérios, sendo eles:

1. Impactos ambientais negativos: A disposição inadequada deste resíduo pode acarretar danos ao solo, água, ar, a fauna, a flora e a saúde humana. Neste item, foram analisadas as alterações do meio ambiente devido o mal gerenciamento do lodo de efluentes, que podem causar odores, atração de insetos, contaminação do solo, subsolo e do ar, contaminação de águas superficiais e subterrâneas.
2. Benefícios ambientais para a população: A prática de soluções adequadas para a eliminação do lodo em ETE's, diminuem os riscos de contaminação do meio ambiente que afetam a saúde pública.
3. Reuso do lodo: Neste item, buscou-se dar prioridade as alternativas que possuem potencial de reaproveitamento do lodo de efluentes.

Logo, foram definidos pesos máximos de 10 (dez) para os subcritérios ambientais, pois são critérios essenciais e limitantes para a escolha da alternativa para a disposição final do lodo de efluentes. Já que a avaliação dos riscos e impactos ambientais de acordo com a alternativa ser adotada é importante para garantir a qualidade da saúde pública e a manutenção do equilíbrio do meio ambiente, buscando alternativas que controlem os impactos negativos e valorizem os impactos ambientais positivos (LARA; ANDREOLI; PEGORI, 2014).

4.4.3 Critérios sociais

Este critério avaliou os impactos gerados na população para a escolha da alternativa da disposição final do lodo de ETE's. A participação da população deve ser obrigatória, e o atraso ao acesso as informações do projeto podem dificultar a aceitação da alternativa proposta e resultar em opiniões negativas sobre o tema. O envolvimento da população local reduzirá a oposição ao projeto (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014).

A falta de conhecimento sobre os benefícios de alternativas para a eliminação do lodo de efluentes, e dos seus impactos ambientais positivos e negativos, dificultam a aceitação da população ao projeto, deve-se garantir o acesso público às informações sobre o controle de qualidade do reaproveitamento do lodo e conscientizar a população as suas vantagens e desvantagens.

Portanto, para a construção da matriz de decisões o critério social foi subdividido em dois subcritérios, sendo eles:

1. Benefícios econômicos para a população: A escolha da alternativa poderá gerar de empregos e renda para a população local. Como não é um aspecto limitante e não tem a obrigatoriedade de ter este retorno econômico, para a implantação da alternativa de disposição final foi adotado um menor de peso 4 (quatro) para este subcritério.
2. Aceitação da população: A participação da população em todo o projeto da forma de disposição e o monitoramento, contribui para a minimização dos impactos, e permitem a melhoria e maior controle do processo. Como o grau de aceitação da população será difícil de mensurar, adotou-se um peso menor de 4 (quatro).

4.4.4 Critérios técnicos

Neste critério, foram analisadas o desempenho técnico operacional de cada alternativa de disposição final do lodo de ETE's, para que o rendimento operacional seja o melhor possível. Para o bom funcionamento da ETE, a alternativa de disposição final deve obter uma simplicidade técnica e operacional, como o tratamento do lodo com cal para remoção de patógenos, que obtém bom desempenho devido ao seu baixo custo implantação e simplicidade no processo (FERNANDES *et al.*, 2014).

Portanto, para a construção da matriz de decisões o critério técnico foi subdividido em dois subcritérios, sendo eles:

1. Remoção de patógenos: A desinfecção do lodo seco com a mistura com a cal, necessita de um período de contato de no mínimo 1 mês para atingir altos níveis de remoção de patógenos. Apesar da ETE – Itabaiana realizar a desinfecção do lodo, o período de contato não informado pela empresa responsável e nem pelos operadores da ETE, como será difícil mensurar a eficiência da remoção de patógenos, adotou-se um peso menor de 4 (quatro) para este subcritério.
2. Complexidade de implantação, operação e manutenção: Como algumas alternativas possuem um processo complexo de operação e manutenção, será priorizado alternativas com mais simples. Por ser um aspecto técnico que influenciará diretamente na escolha da disposição final do lodo, adotou-se um peso de 8 (oito) para este subcritério.

4.4.5 Critérios legais

Neste critério, foram analisados conhecimentos sobre as exigências legais sobre os métodos de manejo e tratamento do lodo de efluentes. Para fins agrícolas a disposição final do lodo deve estar de acordo com os critérios da Resolução CONAMA 498/2020, que definem os limites máximos admissíveis de concentração de metais pesados, as possibilidades de reuso e a necessidade de monitoramento da qualidade do lodo. A constante busca por menores impactos ambientais negativos, tornam os aspectos legais cada vez mais exigentes, e assim garantir uma forma mais adequada de disposição.

Diante da necessidade de minimização da geração de resíduos sólidos, a Lei nº12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), traz em suas diretrizes o plano de gerenciamento de resíduos sólidos como um instrumento propulsor de mudanças e avanços para uma gestão eficiente dos resíduos gerados. A PNRS tem como o objetivo a aplicação de um conjunto de ações apropriadas, no que diz respeito a coleta, transporte, tratamento e disposição final ambientalmente adequada. Com isso, é assegurando melhorias na qualidade ambiental das áreas habitadas, além de fornecer vantagens econômicas expressivas.

Para a construção da matriz de decisões, os critérios legais serão alinhados com os objetivos da PNRS, no qual a análise das alternativas de disposição final para o lodo de efluentes dará preferência àquelas que possuírem melhores condições de qualidade para saúde humana e ao meio ambiente, e priorizem a redução da geração do lodo e a sua reciclagem. Deste modo, o subcritério legal é definido como Alinhamento com a PNRS e possui um peso 8. A escolha dos subcritérios e a definição dos pesos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Lista de critérios, subcritério e pesos adotados

Item	Critérios	Subcritérios	Pesos
1	Econômico	Custo de implantação	10
		Custo de operação e manutenção	10
2	Ambiental	Impactos ambientais negativos	10
		Benefícios ambientais para população	10
		Reuso do lodo	10
3	Social	Benefícios econômicos para população	4
		Aceitação pela população	4
4	Técnico	Complexidade com a implantação, operação e manutenção	8
		Remoção de patógenos	4
5	Legal	Alinhamento com a PNRS	8

Fonte: A autora (2022).

4.5 Elaboração da matriz de decisões

A elaboração da matriz de decisões das alternativas da disposição final do lodo citadas neste trabalho foi desenvolvida com base em critérios relevantes e na sua importância. A matriz foi elaborada de acordo com os determinados pesos que variam de 1 a 10 para analisar o comportamento de cada alternativa. Assim, obteve-se um resultado no qual as alternativas foram propostas de forma organizada, indicando as melhores alternativas para a solução do problema proposto.

Para a elaboração da matriz foi utilizada a técnica estatística de ponderação aditiva simples, no qual é possível usar critérios independentes ou dependentes para a transformação de critérios qualitativos em critérios quantitativos. Isto é, fazer de cada alternativa, o somatório das avaliações dos critérios e multiplicar pelos pesos respectivos (GOLDMAN, 2015). Esta técnica irá auxiliar o Agente Decisor na tomada de decisão em relação aos critérios e entre alternativas propostas.

Para a construção da matriz de resultados, os critérios foram subdivididos em subcritérios para auxiliar a análise de cada critério adotado. Cada subcritério possui um peso de acordo com a sua importância, sendo analisada a potencialidade das alternativas do uso do lodo de efluente na busca de minimizar a sua produção, maximizar o seu reuso e promover as alternativas de disposição final adequada.

Com o auxílio do programa Excel a matriz de decisões será elaborada e para facilitar os cálculos será adota a seguinte fórmula (LOUREIRO, 2021):

$$Vi = \sum_{j=1}^n Wj \times Vij$$

Onde:

V_i = pontuação final para a alternativa j

W_j = peso atribuído ao critério

V_{ij} = pontuação obtida da alternativa i sob o critério j

n = n° total de critérios

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estimativa da produção de lodo da ETE – Itabaiana

O sistema de tratamento de efluentes do município de Itabaiana, atende apenas os efluentes de origens domésticas, como, efluentes residenciais e centros comerciais. As operações na ETE – Itabaiana iniciou-se no ano de 2018 e possui a previsão da implantação total do sistema de esgotamento sanitário no município é de 20 anos, e pretende atender uma população esgotável de 110.651 habitantes. O abastecimento de água no município é de forma contínua, 7 dias na semana, durante as 24h, e adotou-se como parâmetro do projeto o consumo de água per-capita de 150 L/hab. dia.

✓ Produção de lodo anaeróbio diário (P. lodo anaeróbio)

Para o cálculo da produção do lodo na fase anaeróbia (lodo primário) foram adotados valores médios encontrados na literatura.

$$P.\text{lodo anaeróbio} = 0,015 \text{ KgSS}/(\text{hab.d}) \times 110.651 \text{ hab} \times 1 \text{ dia}$$

$$P.\text{lodo anaeróbio} = 1.660 \text{ Kg}/\text{dia ou } 1,66 \text{ ton}/\text{dia}$$

✓ Produção de lodo anaeróbio em 90 dias (P. lodo anaeróbio)

Como citado anteriormente a remoção do lodo no leito de secagem será realizada no período de cada 3 meses, sendo necessário calcular a produção do lodo anaeróbio num período de 90 dias.

$$P.\text{lodo anaeróbio} = 0,015 \text{ KgSS}/(\text{hab.d}) \times 110.651 \text{ hab} \times 90 \text{ dias}$$

$$P.\text{lodo anaeróbio} = 149.379 \text{ Kg ou } 149,4 \text{ ton}$$

✓ Remoção de DQO fase anaeróbia

Antes de calcular a produção de lodo aeróbio, é necessário adotar a eficiência média remoção de DQO encontrada na literatura de 68%, pois resulta da redução da quantidade de sólidos suspensos presentes no efluente, o que interfere na quantidade de sólidos presentes na etapa do tratamento aeróbio.

✓ **Produção de lodo aeróbio diária (P. lodo aeróbio)**

Para o cálculo da produção de lodo na fase aeróbia (lodo secundário) foi aplicado os valores médios adotados foram encontrados na literatura.

$$P. \text{ lodo aeróbio} = 0,011 \text{ KgSS}/(\text{hab. d}) \times 110.651 \text{ hab} \times 1 \text{ d} \times (1 - 0,68)$$

$$P. \text{ lodo aeróbio} = 390 \text{ kg}$$

✓ **Produção de lodo aeróbio em 90 dias (P. lodo aeróbio)**

A remoção do lodo no leito de secagem será realizada no período de cada 3 meses, sendo necessário calcular a produção do lodo aeróbio num período de 90 dias.

$$P. \text{ lodo aeróbio} = 35.054 \text{ kg ou } 35 \text{ ton}$$

✓ **Produção total diária de lodo líquido**

Logo, a massa total de lodo produzido e descartado na fase líquida será a somatória da produção lodo anaeróbio e do lodo aeróbio.

$$P. \text{ total de lodo diária} = 1.660 \text{ kg} + 390 \text{ kg}$$

$$P. \text{ total de lodo diária} = 2.050 \text{ kg/dia ou } 2,05 \text{ ton/dia}$$

✓ **Produção total de lodo líquido em 90 dias**

$$P. \text{ total de lodo} = 184,4 \text{ ton}$$

Em sistemas de tratamento de efluentes compostos por digestores anaeróbios e lodos ativados, o lodo aeróbio excedente retorna para ao DAFA's com menores valores de volume e massa, pois houve uma perda de sólidos no decantador secundário, e sofre digestão e adensamento juntamente com o lodo anaeróbio (SPERLING; GONÇALVES,

2014). O sistema adotado normalmente apresenta uma baixa produção de lodo, já que o tempo de permanência é baixo, dando pouca chance para a digestão do lodo no tanque de aeração, o que explica a menor quantidade de lodo aeróbio gerado.

Por meio da relação entre DQO e SS produzidos no tratamento de efluentes, é possível estimar a quantidade de lodo na sua fase líquida no período de três meses, mas como o lodo passa pelo processo de desidratação no local, é necessário estimar a produção trimestral do lodo em sua fase sólida. Logo, foram calculadas a produção lodo diária do lodo e a produção em 90 dias.

✓ **Volume diário de lodo líquido**

$$V = (2.051 \text{ kg/dia}) / (1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,04) = 51,3 \text{ m}^3/\text{dia}$$

✓ **Volume total de lodo líquido em 90 dias**

$$V = 51,3 \text{ m}^3/\text{dia} \times 90 \text{ dias} = 4.617 \text{ m}^3$$

✓ **Volume diário de lodo seco**

$$V = (2.051 \text{ kg/dia}) / (1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,25) = 8,2 \text{ m}^3/\text{dia}$$

✓ **Volume total de lodo seco em 90 dias**

$$V = 8,2 \text{ m}^3/\text{dia} \times 90 \text{ dias} = 738 \text{ m}^3$$

Com os valores obtidos, pode-se estimar uma produção de lodo na sua fase líquida de 51,3 m³/dia o que leva uma produção trimestral de 184,4 toneladas, os valores encontrados são próximos ao serem comparados com as quantidades dimensionadas no memorial descritivo da ETE, no qual estimou um volume de 46 m³/dia e uma produção trimestral de 169,3 toneladas do lodo gerado na ETE.

A estimativa da produção de lodo em ETE, serve para demonstrar o quantitativo de lodo gerado na ETE, e indicar o potencial econômico do reuso deste resíduo sólido entre as alternativas ambientalmente adequadas para a sua destinação final.

5.2 Análise das alternativas para disposição final do lodo de ETE

Neste item, é apresentado uma análise preliminar das alternativas de disposição final para o lodo de efluentes, avaliando os riscos e vantagens de cada prática e o seu envolvimento entre os critérios de avaliações propostas de acordo com a condição local da ETE em estudo, e baseou-se no referencial teórico sobre o tema, devido a pesquisa de diversos autores sobre o tema em estudo.

Como já citado anteriormente, foram selecionadas as alternativas de disposição final para o lodo de ETE mais comuns encontradas na literatura, para auxiliar nas avaliações técnicas, econômicas, sociais, legais e ambientais. As alternativas escolhidas foram: incineração, aterro sanitário, *landfarming*, recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola. As principais vantagens e desvantagens, como também, comentários sobre as alternativas, estão descritas no Quadro 12.

Quadro 12 – Principais alternativas para disposição final do lodo de ETE (continua).

Alternativa de disposição final	Vantagens	Desvantagens	Comentário
Incineração	Alta redução do volume do lodo. Não necessita passar pela etapa de estabilização do lodo. Pode ser utilizada como uma alternativa emergencial.	Poluição atmosférica; alto custo de operação; necessita de um local para a disposição de cinzas. Não há reuso ou reciclagem do lodo.	Processo de decomposição térmica via oxidação do lodo para redução do seu volume, e transformando sua parcela de sólidos em cinzas. É necessário que haja o monitoramento e controle da emissão de gases dos incineradores.
Aterro sanitário	Baixo custo. Não necessita passar pela etapa de estabilização do lodo. Recebe altas quantidades de lodo.	Não há reuso ou reciclagem do lodo. Produção de gases e percolados. O lodo deve possuir entre 35 e 40% de teor de sólidos para redução do seu volume e da produção de lixiviado.	Disposição do lodo em valas ou trincheiras. O lodo pode ser disposto em aterros exclusivos ou juntamente com resíduos sólidos urbanos. Pode ser utilizada quando o lodo não apresenta características de uso benéfico do resíduo. Alto custo para a construção de um aterro exclusivo para a disposição final do lodo e apresenta baixo custo-benefício.

Fonte: A autora (2022).

Quadro 14 – Principais alternativas para disposição final do lodo de ETE (continua).

Alternativa de disposição final	Vantagens	Desvantagens	Comentário
<i>Landfarming</i>	Recebe altas quantidades de lodo por vários anos. Degradação da matéria orgânica de baixo custo. Não necessita passar pela etapa de estabilização do lodo.	Contaminação do solo com metais pesados e compostos tóxicos. Odores e atração de vetores. Pode inviabilizar a área para usos futuros. Elevado custo de operação e manutenção.	Lançamento do lodo na superfície do solo, onde o solo é usado como um sistema de tratamento do lodo e a sua exposição ao sol degrada a matéria orgânica. De acordo com a NBR 13.894/1997, recomenda-se áreas com declividade inferior a 5% pois possibilita a redução da velocidade de escoamento e evitar a contaminação de águas superficiais. A instalação deve ter uma distância mínima de 200 m de qualquer corpo hídrico e possuir uma certa distância de núcleos populacionais.
Recuperação de áreas degradadas	Possui resultados positivos sobre a recuperação da flora e do solo. Altas taxas de aplicação podendo alcançar até 450 toneladas por hectare. Melhoria nas características físicas do solo.	Odores e atração de vetores. Contaminação de águas subterrâneas e superficiais, da fauna e flora. Limitações de uso pois pode provocar a contaminação por organismos patogênicos, caso não haja o controle adequado.	Uso do lodo em solos que estão fisicamente desestruturados, e não apresenta condições de uso e desenvolvimento de vegetação por falta de nutrientes. O bio sólido ser destinado para o uso deve possuir as seguintes características: ter potencial agrônomo; ser redutor de atração de vetores e possuir substâncias químicas essenciais para o solo.

Fonte: A autora (2022).

Quadro 14 – Principais alternativas para disposição final do lodo de ETE (conclusão).

Alternativa de disposição final	Vantagens	Desvantagens	Comentário
Reciclagem agrícola	Solução a longo prazo. Alto potencial de uso como fertilizante. Possui uma resposta positiva no uso em culturas. Reduz o uso de fertilizantes químicos. Existe o uso benéfico dos nutrientes e matéria orgânica do lodo.	Contaminação de alimentos com substâncias tóxicas e organismos patogênicos. Odores. A reciclagem agrícola do lodo tem limitações em relação a taxa de aplicação, pois os critérios estabelecidos para o seu uso exigem a estabilização do lodo para a degradação da matéria orgânica e a higienização para a remoção dos patógenos.	Uso do lodo como fertilizantes, após passar por todas as etapas do seu tratamento. A Resolução CONAMA 498/2020 proíbe o uso de lodo em plantios onde a parte comestível entre em contato com o solo, como também em raízes e olerícolas. Possuem vários estudos sobre o aproveitamento do lodo em plantios de milho, feijão, cana-de-açúcar e entre outros. Nos quais há um resultado positivo no desenvolvimento dos plantios.

Fonte: A autora (2022)

A busca de alternativas de disposição final do lodo de efluente ressalta a preocupação em gerenciar este resíduo de maneira adequada, deste do tratamento até ao seu descarte final. Desta maneira, é possível controlar e minimizar os impactos negativos causados pela prática inadequada deste resíduo, de acordo com o sistema de tratamento adotado, da eficiência da operação e manejo, da obediência às legislações e da eficiência do plano de monitoramento (LARA; ANDREOLI; PEGORINI, 2014).

De acordo com as avaliações feitas, é possível identificar os principais impactos negativos de cada alternativa de disposição final proposta. Os impactos ambientais apresentados no Quadro 13 devem auxiliar na escolha de uma alternativa que apresente melhores condições para o meio ambiente e a saúde pública.

Quadro 13 – Principais impactos ambientais relacionados a alternativas de disposição final de lodo de efluente.

Alternativas de disposição final	Principais impactos negativos
Incineração	Poluição atmosférica através de gases orgânicos, metais, particulados e odores.
Aterro sanitário	Poluição de águas superficiais e subterrânea; lixiviação e produção de líquidos percolados.
<i>Landfarming</i>	Poluição imediata do solo; de águas superficiais e subterrâneas; e contaminação de alimentos.
Recuperação de áreas degradadas - RAD	Potencializa os riscos de erosão e lixiviação.
Reciclagem agrícola	Riscos de contaminação por substâncias tóxicas e à presença de patógenos, comprometendo a saúde pública e ao meio ambiente.

Fonte: Lara; Andreoli; Pegorini, 2014.

Além das alternativas mencionadas acima, algumas alternativas não foram discutidas neste trabalho, como, o uso na construção civil, cogeração de energia e incineração com obtenção de águas potável. Apesar, de apresentarem resultados positivos, a sua operação e manutenção possuem um custo elevado no processo de reciclagem do lodo e acaba sendo inviável para a realidade da ETE em estudo, pois procura-se uma alternativa que seja factível no ponto de vista econômico.

5.3 Análise da matriz de decisões

Com a definição das alternativas de disposição final, os critérios de avaliações e os seus pesos, foi feita a construção da matriz de decisões sobre a disposição final do lodo de efluente. Neste item, cada alternativa recebeu uma pontuação de acordo com o critério analisado, a classificação variou entre 1 e 5. O resultado da construção da matriz pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de decisões para a escolha da alternativa de disposição final.

Critérios de avaliação	Incineração	Aterro Sanitário	Landfarming	RAD	Reciclagem agrícola	Peso
Custo de implantação	1,5	2	3	4,5	3,5	10
Custo de operação e manutenção	1,5	2	2,5	5	4	10
Impactos ambientais negativos	2	2	2	3	4,5	10
Benefícios ambientais para população	2	1	3	4,5	4	10
Reuso do lodo	1	1	3	4,5	4	10
Benefícios econômicos para população	1	2	1,5	3,5	5	4
Aceitação pela população	4	4,5	3	2,5	1,5	4
Complexidade com a implantação, operação e manutenção	2	2	3	4,5	4	8
Remoção de patógenos	5	1	3	2	3,5	4
Alinhamento com a PNRS	2	2	3	4,5	4	8

Fonte: A autora (2022).

Observando a Tabela 7, pode-se avaliar a influência do peso atribuído aos critérios de avaliação estabelecidos e a sua importância no processo de decisão da alternativa mais viável para a destinação do lodo da ETE do município de Itabaiana. Os critérios que possuem o maior peso, como, custo de implantação, custo de operação e manutenção, impactos ambientais negativos e reuso do lodo, são os principais limitantes para a implantação da alternativa de disposição final na ETE.

Em relação aos critérios ambientais, quanto maior for a pontuação, menor será o impacto ambiental negativo e maior será o nível de reuso do lodo. Já nos critérios econômicos, quanto menor for a pontuação, maior será o custo da execução da alternativa.

Nos subcritérios sociais, o peso atribuído é menor por não ser um fator limitante para a implantação. Então, para a aceitação da população, quanto maior for a pontuação, maior será a aceitação. E em relação a geração de benefícios econômicos, quanto maior for a pontuação, maior será os benefícios do reuso do lodo, então foi priorizada as alternativas que possuem o maior nível de reaproveitamento do lodo.

Nos critérios técnicos e legais, foram priorizadas as alternativas que possuem um sistema operacional mais simples, e que priorizam a redução da produção de lodo e o seu reaproveitamento. Logo, quanto maior for a pontuação, melhor será a alternativa de disposição final do lodo por possuir melhores condições de qualidade de vida para saúde humana e o meio ambiente.

Portanto, com a organização dos dados através da matriz de decisões para uma escolha viável de alternativa de disposição final do lodo gerado pela ETE localizada no município de Itabaiana, obteve-se a classificação das alternativas de acordo com a técnica estatística de ponderação aditiva simples, usada para auxiliar a decisão em relação aos critérios estabelecidos e as alternativas propostas. A classificação das alternativas pode ser observada na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação das alternativas de disposição final para a ETE-Itabaiana

Ordem	Alternativa de disposição final	Pontuação
1º	Reciclagem agrícola	314
2º	Recuperação de áreas degradadas	309
3º	<i>Landfarming</i>	213
4º	Incineração	152
5º	Aterro Sanitário	142

Fonte: A autora (2022).

Como pode ser observado na Tabela 8, o resultado obtido com a análise dos critérios adotados, indica que a alternativa da reciclagem agrícola é a mais viável para a realidade da ETE-Itabaiana. Vale destacar que as alternativas que apresentam bons níveis de reaproveitamento do lodo de efluente, como a recuperação de áreas degradadas e *landfarming*, obtiveram um bom desempenho quando comparado as outras opções. E as alternativas de incineração, aterros sanitários obtiveram um desempenho baixo em relação às três primeiras opções.

A reciclagem agrícola é a alternativa mais econômica e ambientalmente mais adequada, pois produz um insumo de boa qualidade para a agricultura, o qual deve ser utilizado de acordo as diretrizes da Resolução CONAMA 498/2020, que dispõe orientações técnicas adequadas, para garantir a segurança ambiental e sanitária. Além de favorecer o produtor rural com a economia na compra de fertilizantes químicos.

Embora a reciclagem agrícola tenha apresentado com uma pontuação maior, é necessário conhecer a composição química do lodo, seus nutrientes e as concentrações de elementos tóxicos e organismos patogênicos. Para evitar impactos ambientais negativos ao aplicar o lodo como fertilizante em culturas e obter apenas ganhos econômicos (BETIOL; CAMARGO, 2005).

Na ETE em estudo, a produção total do lodo é alta, um fator importante na escolha da alternativa a ser adotada. O lodo passa por todas as etapas de tratamento de adensamento, estabilização, desinfecção, desidratação e higienização, já se encontra pronto para o reaproveitamento. Pode-se então, iniciar a reciclagem agrícola em algum plantio próximo a ETE e começar um estudo sobre o desenvolvimento da cultura com a aplicação do lodo como bissólido.

Já a recuperação de áreas degradadas, o fator limitante para a escolha para ser a alternativa de disposição final, é na grande quantidade de lodo que pode ser aplicado no solo, com menor grau de exigência nos requisitos legais, o que leva a ser a alternativa mais viável para a disposição do lodo, mas deve-se ter o cuidado na escolha do local a ser recuperado para evitar a potencialização dos processos erosivos.

A disposição superficial no solo, ou landfarming, é uma alternativa destinada para os resíduos que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, devido à alta concentração de poluentes. Para a disposição superficial do lodo no solo, o projeto deve possuir proteção às águas superficiais e subterrâneas, planos de operação, monitoramento, de emergência e de encerramento das atividades, o que torna esta alternativa mais complexa e com custos mais elevados. O que torna esta alternativa pouco viável para a disposição final do lodo na ETE- Itabaiana.

A incineração apesar de ser muito utilizada nos países europeus e no Japão, onde 60% do lodo produzido é destinado para incineração. O crescimento do uso desta alternativa é devido as restrições ao uso de aterros sanitários e de incentivos econômicos para a reciclagem deste material. Porém a incineração não é classificada como uma alternativa de valorização, pois o seu balanço energético é negativo, devido ao elevado teor de água no lodo (FERNANDES et al., 2014).

A incineração é um tratamento bastante eficiente, pois reduz drasticamente o volume do lodo e os organismos patogênicos. Porém, é uma técnica que apresenta um alto custo pois os incineradores são equipamentos modernos equipados com filtros e a necessita de constante controle e monitoramento das emissões de gases, além de necessitar de um local para a destinação adequada para as cinzas. Para a ETE em estudo, é uma alternativa inviável pois seria necessário contratar mão-de-obra especializada para a elaboração do projeto, para a operação e manutenção do sistema, além de construir uma nova estrutura para a instalação do incinerador.

A disposição final do lodo em aterros sanitários, apesar de possuir um baixo custo de operação, não se apresenta ser uma alternativa viável pôr não apresentar benefícios econômicos e ambientais para a população e o meio ambiente. A prática de disposição do lodo em aterros sanitários não possui nenhum reaproveitamento dos nutrientes presentes no lodo, não há a exigência de realizar a etapa de estabilização do lodo e a sua higienização, ou seja, o lodo não passa pelo processo de redução da matéria orgânica e de organismos patógenos antes da sua disposição em aterros sanitários. De acordo com a realidade da ETE-Itabaiana, está opção seria viável apenas para situações emergenciais, já que se encontra na ETE uma grande quantidade de lodo seco para ser descartado.

A reciclagem agrícola é uma alternativa que se destaca por fornecer benefícios ambientais e econômicos, pois faz o uso benéfico do lodo e apresentam valores satisfatórios para a realidade da ETE em estudo, e não necessita de grandes investimentos para a implantação da alternativa. E se enquadra com os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em tratar, reduzir a sua produção, reaproveitamento, reciclagem e dispor o resíduo de maneira ambientalmente adequada.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar critérios para a destinação final do lodo provenientes da Estação de Tratamento de Efluentes do município de Itabaiana, com a intenção de auxiliar a tomada de decisão na escolha de uma alternativa e fornecer orientações para a gestão do lodo gerado no sistema de tratamento de efluentes.

A implantação de um sistema de aproveitamento do lodo, na ETE- Itabaiana, configura uma alternativa eficiente na redução do volume de lodo que se encontra estocado em áreas da ETE, juntamente com a destinação ambientalmente adequada deste resíduo. Em geral, a maioria das ETE's brasileiras não dispõem em seus projetos a forma de gerenciamento do lodo, sendo comum o lançamento do lodo em corpos receptores ou recorrem a alternativas emergenciais, como, a calagem do lodo seco e estocagem em áreas da ETE (FERNANDES *et al.*, 2014).

Portanto, faz-se necessário o estudo de alternativas para a disposição final do lodo para o descarte do lodo da ETE- Itabaiana, pois há um crescimento nas exigências sociais e dos órgãos ambientais na melhora das condições de qualidade de vida em relação aos

serviços de saneamento básico. Já que o mal gerenciamento deste resíduo provoca impactos ambientais negativos ao meio ambiente e à saúde pública por obter características potenciais de contaminação.

As alternativas de disposição final do lodo de efluentes analisadas foram a disposição em aterros sanitários, incineração, *landfarming*, recuperação de áreas degradadas e reciclagem agrícola. Para analisar os possíveis impactos da escolha de uma alternativa foi utilizado a técnica de análise de multicritérios, e os critérios aplicados ao estudo de caso foram referentes aos aspectos ambientais, econômicos, legais, técnicos e sociais.

A metodologia utilizada neste trabalho auxiliou na estimativa da produção de lodo da ETE-Itabaiana, pode observar que a produção do lodo é alta, e caso a ETE continue sem uma alternativa de disposição final adequada, a tendência é o acúmulo deste resíduo que se encontra sem uso na área da ETE. Vale destacar, a análise de multicritério com o auxílio do método estatístico de Ponderação Aditiva Simples, pela simplicidade de aplicação e a classificação direta das alternativas propostas.

Ao aplicar este método, a alternativa de disposição final do lodo que mais se enquadra com a condições da ETE em estudo, foi a reciclagem agrícola, que mostra ser uma solução para o uso benéfico do lodo, como fertilizante agrícola, é uma alternativa que possui bom custo-benefício, pois atende as exigências ambientais e fornece benefícios econômicos para a população.

A quantidade total de lodo gerado por uma estação é um aspecto importante na para a viabilidade econômica da alternativa de reciclagem agrícola. Com base nos resultados obtidos a ETE- Itabaiana tem uma produção diária de 2,05 toneladas e a cada três meses uma produção de 184,4 toneladas. Neste sentido, a implantação da reciclagem possui grande viabilidade econômica.

Como a ETE-Itabaiana apenas recebe efluentes de origem doméstica, o uso do lodo para a reciclagem agrícola, não apresenta restrições quanto a sua qualidade. Observando as características quali-quantitativas e da realidade da ETE em estudo, o lodo gerado pelo sistema de tratamento de efluentes possui potencial de reaproveitamento para fins agrícolas pois atende as exigências legais do tratamento do lodo.

Por fim, como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se realizar um estudo com análises físico-químicas e microbiológicas do lodo, para verificar as concentrações de elementos tóxicos e dos agentes patogênicos, e assim garantir a sua qualidade para a aplicação em culturas e evitar a sua contaminação. Recomenda-se também realizar um estudo de viabilidade econômica para que a execução do projeto seja viável e aplicar o lodo em algum plantio próximo a área da ETE para avaliar o seu desenvolvimento e qualidade, e realizar ajustes para atender as diretrizes legais.

7. REFERÊNCIAS

ABRELPE **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** 2016. Abrelpe, 2016.

ALAMINO, RCJ. **A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: Viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais**. 2010. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado (Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ANDREOLI, C. V. et al. (Org.). **Uso e manejo de lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: Abes, 1999. 97 p. Projeto PROSAB

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (org.). **Reciclagem de bioresíduos: transformando problemas em soluções**. 2. ed. Curitiba: SANEPAR, FINEP, 2001. 288 p.

ANDREOLI, C.; ILHENFELD, R.; PEGORINI, E. Fatores limitantes. **Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB). Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Brasil**, p. 46-63, 1999.

ANDREOLI, C.V (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, 2006. 417 p.

ANDREOLI, Cleverton V. (Coord.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES, cap.1, p. 21 -23, 2009.

ANDREOLI, Cleverton 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, Cleverton V.; PEGORINI, Eduardo S.; FERNANDES, Fernando. **Disposição do lodo no solo. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, v.6, p. 317- 392, 2014.

ANDREOLI, Cleverton V. et al. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, cap.2 e 3, p.29 - 84, 2001.

ANDREOLI, Cleverton V.; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. In: Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG. 2014. p.11.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13894: **Tratamento no solo (Landfarming)**. p.2 Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <https://document.onl/documents/abnt-1997-nbr-13894-tratamento-no-solo-landfarming-pdf.html>Acesso em: 01 de nov. de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. p. 87 Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <http://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-8419-92-Apresentacao-de-Projetos-de-Aterros-Sanitarios-de-Residuos-Solidos-Urbanos.pdf>. Acesso em: 28 de mar. de 2022.

BATISTA, Lucilene Ferreira. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. [Dissertação de Mestrado] em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, 2015.

BETTIOL, W.; CAMARGO, OA de. **Impacto ambiental do uso agrícola de lodo de esgoto**. In: Seminário Internacional sobre Microbiologia Aplicada ao Meio Ambiente: Antecedentes Históricos e Perspectivas. São Paulo/SP, p. 1-19, 2005.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Diário Oficial da União, Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 16 mar. 2022.

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. 183p.: il., 1 jan. 2020.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 498 de agosto de 2020**. Define critérios e procedimentos, para a produção e aplicação de bioestabilizado em solo, e dá outras providências.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 001 de agosto de 1986**. Considera a necessidade de se estabelecerem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.

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

CARVALHO, M. do C. et al. **Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais**. Governo do Estado São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente, 2013.

CHAGAS Welington Ferreira. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro.** [Dissertação de Mestrado] Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública; 2000. 89 p.

CLAUREN, M. M. **Determinação das Espécies de Cromo nas Cinzas da Incineração de Couro Wet-Blue em Reatores de Leito Fixo e Leito Fluidizado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, f. 90, 2001.

COGGER, C. G.; FORGE, T. A.; NEILSEN, G. H. **Biosolids recycling: Nitrogen management and soil ecology.** Canadian Journal of Soil Science, v. 86, n. 4, p. 613-620, 2006.

COSTA, Aureliano; COSTA, A. N. **Manual de uso agrícola e disposição do lodo de esgoto para o estado do Espírito Santo.** Livros, cap. 01, p. 11-18, 2015.

SILVA, S. M. C. P. et al. **Principais contaminantes do lodo.** In: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 6. Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final, p.67. 2014.

FERNANDES, Fernando et al. **Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE.** ANDREOLI, CV; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. v.6 Cap.7, p. 297-315, 2014.

FERNANDES, Fernando; SOUZA, S. G. **Estabilização de lodo de esgoto. Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final,** v. 1, p. 32-57, 2001.

FREDDO, Alessandra. **Caracterização físico-química de lodo proveniente de duas estações de tratamento de esgoto da região oeste de Paraná.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

GOLDMAN, F. L. **Sistemas de Apoio à Decisão: 2ª Parte,** 1º Semestre de 2015, Notas de Aula (Mimeo). 2015.

GONÇALVES, R. F et al. **Remoção da umidade de lodos de esgotos.** ANDREOLI, CV; Von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Ed.). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6, p. 157-258, 2014.

GOULART, M.; CALLISTO, M. **Bioindicadores da qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental.** Revista da FEPAM, v. 2, nº 1. 2002.

HART, J.B.; NGUYEN, P.V.; URIE, D.h.; BROCHKWAY, D.G., (1988). **“Silvicultural use of wastewater sludge”.** In: Jornal of Forestry, 17, p.17-24.

ITABAIANA. **Lei Municipal Nº 1.870, de 25 de junho de 2015.** Aprova o Plano Municipal de Água e Esgoto de Itabaiana/Sergipe. Itabaiana, 2015. Disponível em https://cmitabaiana.se.gov.br/download/lei_1870_-_pmsa.pdf. Acesso: out. 2022

IWAKI, Gheorge. **Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs.** 2017. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-et-es/>>. Acesso em: 19 ago.2022.

JANNUZZI, P. de M.; MIRANDA, WL de; SILVA, DSG da. **Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações.** Informática Pública, v. 11, n. 1, p. 69-87, 2009.

JORDAO, E.P.; PESSOA, C.A., **Tratamento de esgotos domésticos.** 4a ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), p.932, 2005.

KELM, T. A. **Avaliação do uso de lodo de estação de tratamento de esgoto na estabilização de materiais para pavimentação.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014, p. 230.

LARA, A.I. de; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. **Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo.** In: ANDREOLI, CV; SPERLING, MV; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, v. 6, p. 423 - 440, 2014.

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.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2021.

LUDUVICE, M. **Processos de estabilização de lodos.** In: ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, Fernando. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. 2ª ed. Belo Horizonte, v. 6, p. 121 – 146, 2014.

LUDUVICE, M; FERNANDES, F. **Principais tipos de transformações e descarte do lodo.** In: ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, Fernando. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. 2ª ed. Belo Horizonte, v. 6, p.397 – 408, 2014.

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

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 (Projeto PROSAB). p. 49 – 108, 2006.

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, M. T. **Higienização de lodos.** In: ANDREOLI, Cleverson V.; SPERLING, M.V.; FERNANDES, Fernando. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. 2ª ed. Belo Horizonte, v. 6, p. 259-290, 2014.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M.; GUEDES, M. C. **Uso do lodo de esgoto em plantações florestais.** In: ANDREOLI, Cleverson V. (Coord.). Alternativas de Uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro, ABES 2006. cap. 6, p. 159 – 184. 006.

QUITANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W. J. **Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica.** **Revista Núcleus.** p. 183 – 192.

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.

SANAPAR; PROSAB. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** Curitiba, 1999, p.9.

SANTOS, Jadson de Jesus. **Visões cartográficas de Itabaiana-SE.** [Dissertação de Mestrado] em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, 2014.

SEDRON. **Processador Janicki Omni (JOP).** 2022. Disponível em: <<https://www.sedron.com/janicki-omni-processor/overview/>>. Acesso em: 08 nov. 2022.

SILVA, F. C, **Uso de resíduos orgânicos na agricultura.** In: SANTOS, G.A; SILVA, L. Z; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F.A de O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, p.597-624, 2008.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. **Alternativa agronômica para o biofóssido: 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.

SKORUPA, L. A.; SOUZA, M. D.; PIRES, A. M. M.; FILIZOLA, H. F.; BETTIOL, W.; GUINI, R. M. A. V. **“Uso de Lodo de Esgoto na Recuperação de Áreas Degradadas”.** In: Andreoli, C. V (coord.). Alternativas de Uso de resíduos do Saneamento – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, p.189-229, 2006.

TSUTIYA, M. T. **Alternativas de disposição fina de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto.** In: W. BETTIOL & O. A. CARMARGO (Ed.). Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, v.1, 2000, p. 69-105.

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

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

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.** Volume 1. 2ª Edição Revisada. Departamento de Engenharia Sanitário e Ambiental. Belo Horizonte, 1996, p. 55-59.