UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE LODO DE ESGOTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO: CARACTERÍSTICAS E DISPOSIÇÃO FINAL

MARIA CLARA DUARTE DE CASTRO

ORIENTADORA: ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE LODO DE ESGOTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO: CARACTERÍSTICAS E DISPOSIÇÃO FINAL

MARIA CLARA DUARTE DE CASTRO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

ARIUSKA KARLA BARBOSA AMORIM, Ph.D. (ENC/FT/UnB)
(ORIENTADOR)

_____

ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, Ph.D. (ENC/FT/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

ANTONIO JOSÉ DE BRITO, Ph.D. Eng. Civil (PPGTARH/UnB)
(EXAMINADOR EXERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 18 DE JULHO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, MARIA CLARA

DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE LODO DE ESGOTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO: CARACTERÍSTICAS E DISPOSIÇÃO FINAL

ix, 67 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2023)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. LODO DE ESGOTO	2. HIGIENIZAÇÃO
3. APLICAÇÃO NA AGRICULTURA	4. SOLARIZAÇÃO
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, M. C. (2023). DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE LODO DE ESGOTO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DO DISTRITO FEDERAL E ENTORNO: CARACTERÍSTICAS E DISPOSIÇÃO FINA*L*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67p.

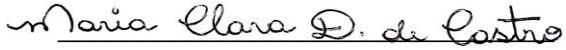
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Maria Clara Duarte de Castro

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Diagnóstico da Geração de Lodo de Esgoto em Estações de Tratamento do Distrito Federal e Entorno: Características e Disposição Final.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2023

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



Maria Clara Duarte de Castro
d.claracastro@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que já não estão mais aqui, mas que inspiraram e ainda inspiram força e perseverança frente a todas as provações. Houveram momentos difíceis e momentos de incertezas frente ao desconhecido, mas o apoio de familiares e amigos permitiu a calmaria em meio ao mar revolto. Agradeço àqueles que acompanharam o desenrolar desta caminhada em seus altos e baixos e não me deixaram ficar pelo caminho.

Agradeço, em especial, ao meu núcleo familiar, por encher minha vida de amor transbordante e apoio incondicional diante do futuro incerto que nos aguarda. Mesmo em meio a conflitos ou divergência de opiniões, o ambiente alegre e confortante de nossa casa é o porto seguro que me alicerça.

Agradeço aos serezinhos irracionais que, inconscientes de sua importância, encheram de amor dias tempestuosos.

Agradeço ao que quer que esteja guiando nossas vidas lá de cima, por proporcionar encontros e coincidências que marcarão pra sempre minha maneira de ver o mundo, pessoas e situações.

Agradeço aos mestres e professores dessa universidade, por compartilhar não só o conhecimento acadêmico que buscamos, mas também a amplitude de significados e diversidades que nos cercam e do qual precisamos. Agradeço também ao curso por me ajudar a compreender o papel do ser humano no mundo e no meio ambiente, e nossa importância na construção de uma sociedade com respeito e sustentabilidade.

RESUMO

O lodo de esgoto, antes visto como um problema acumulado em Estações de Tratamento de Esgoto, hoje é compreendido como uma alternativa sustentável de fertilização do solo para áreas agrícolas ou área que sofreram significativa degradação. O potencial agrícola associado aos componentes inerentes ao lodo, em especial o carbono, nitrogênio e fósforo, indica sua capacidade de auxiliar na melhora das características do solo em contraste ao uso excessivo de fertilizantes químicos. Todavia, o lodo incorpora constituintes poluidores diversos presentes no esgoto afluente à ETE, como organismos patogênicos, metais poluentes, hormônios, fármacos e microplásticos. Dessa forma, há a necessidade de regular suas formas de disposição e a composição do lodo permitida para cada uso, seja ele em plantações diversas ou mesmo aplicação em áreas que sofreram degradação por mineração garantindo que o resíduo tratado, transformado em biossólido, ao ser aplicado no ambiente, não será capaz de prejudicar o ecossistema em que será inserido ou a saúde dos trabalhadores locais e moradores próximos. No Distrito Federal, essa regulação é feita pelas em âmbito federal pela Norma CONAMA N° 498/2020, e em âmbito distrital pela Norma CONAM N° 03/2006. Baseando-se nas restrições e classificações especificadas em tais normas, percebe-se a necessidade de um tratamento adequado desse material para garantir uma disposição segura e que atenda às necessidades do solo. Diversas formas de remoção de umidade e higienização do lodo podem ser analisadas para a escolha do método de tratamento mais eficiente, as características desse tratamento devem considerar aspectos como o tipo de sistema de esgoto existente no local, o volume de produção total do lodo de esgoto e o clima da região ao decorrer do ano. Atualmente, algumas ETEs do Distrito Federal possuem tratamentos preliminares do lodo na própria ETE, como adensamento, estabilização e deságue por centrífuga. Porém, de forma geral, mesmo para as ETEs com sistemas internos de tratamento, todo lodo produzido no DF é transportado para tratamento de forma centralizada na Unidade de Gerenciamento de Lodo da CEASB, passando por método de solarização, que garante um produto final com Classe A. O período de tratamento pode chegar a aproximadamente 12 meses, passando por revolvimentos e espalhamentos do lodo por maquinário específico na época de seca. Pode-se então considerar alternativas para melhorar a eficiência desse tratamento, diminuindo o tempo total para sanitização do material e a área total usada para o tratamento, tal qual a secagem térmica e a compostagem.

Palavras-chave: Lodo de esgoto; Higienização; Aplicação na Agricultura; Solarização;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9

2. OBJETIVOS 11

2.1. OBJETIVO GERAL 11

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

3.1. PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO DISTRITO FEDERAL ... 12

3.2. CARACTERÍSTICA DA PRODUÇÃO DE LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO 15

3.3. TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO 22

3.3.1. Tratamento 22

3.3.1.1. Estabilização do lodo de esgoto 23

3.3.1.2. Remoção da umidade 24

3.3.1.2.1. Adensamento 26

3.3.1.2.2. Condicionamento 26

3.3.1.2.3. Desidratação 27

3.3.1.3. Higienização do lodo de esgoto 31

3.3.2. Disposição 34

4. METODOLOGIA 39

4.1. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DE LODO NO DF E CARACTERÍSTICAS 39

4.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS PRINCIPAIS DE TRATAMENTO 46

4.3. COMPARAÇÃO DE INFORMAÇÕES 46

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 47

5.1. DISPOSIÇÃO DO LODO NA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO (UGL) 47

5.2. PROCESSO DE ANÁLISE DE QUALIDADE DO LODO 53

5.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS PRINCIPAIS DE TRATAMENTO 57

5.3.1. Compostagem: 57

5.3.2. Secagem térmica 61

6. CONCLUSÃO 63

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Distribuição de Sólidos no Lodo de Acordo com Tamanho e Fração Orgânica. 16
Figura 3.2 - Composição de Matéria Orgânica no Lodo de Esgotos Domésticos. 16
Figura 3.3 - Alternativas de Tratamento para Lodos de Esgoto. 23
Figura 3.4 - Variação do Volume de Lodo em Função do Teor de Água. Fonte: PROSAB (1999). 25
Figura 4.1 - Fluxograma das Etapas do Projeto Final. 39
Figura 4.2 - Unidade de Gerenciamento de Lodo, Samambaia-DF. 41
Figura 4.3 - Perfil típico da baia de secagem de lodo e Detalhe da caixa de manobra em planta baixa e corte. Fonte: CAESB (2023). 42
Figura 4.4 - Baias de Estocagem 42
Figura 4.5 – Lagoa de Equalização 43
Figura 4.6 – Pátios de Secagem 43
Figura 4.7 – Revolvimento do lodo por trator durante solarização. 44
Figura 4.8 – Galpões de Armazenamento 45
Figura 4.9 – Caminho percorrido pelo lodo desde a ETE até sua destinação final. 45
Figura 5.1 - Processos de pré-tratamento interno do lodo produzido nas ETEs Brasília Norte e Brasília Sul. 52
Figura 5.2 - Processos de pré-tratamento interno do lodo produzido na ETE Melchior. 53
Figura 5.3 - Área de lodo seco em processo de queima devido às temperaturas internas do lodo. 56
Figura 5.4 - Fluxograma de Solicitação para Uso do Lodo em Áreas Agrícolas 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação de ETE geridas pela CAESB com sistemas de tratamento associados e características associadas. 13
Tabela 3.2 - Relação de ETE geridas pela CAESB com sistemas de tratamento associados e características associadas (continuação). 14
Tabela 3.3 - Produção teórica e características do lodo em função do tipo de tratamento de esgoto utilizado na ETE. 15
Tabela 3.4 - Concentração de Organismos Patogênicos em Lodos Primários e Digeridos. 18
Tabela 3.5 - Concentração de Organismos Patogênicos em Lodos Primários e Digeridos (continuação). 19
Tabela 3.6 - Concentração de Poluentes Emergentes Apontados em Lodos Brutos de Diferentes Países. 19
Tabela 3.7 - Concentração de Poluentes Emergentes Apontados em Lodos Brutos de Diferentes Países (continuação). 20
Tabela 3.8 - Classificação dos Lodos de ETEs. 21
Tabela 3.9 - Classificação dos Lodos de ETEs (continuação). 22
Tabela 3.10 - Tecnologias de Estabilização do Lodo e Métodos de Disposição Final 24
Tabela 3.11 - Efeitos de Processos Condicionantes 27
Tabela 3.12 - Características Associadas à Aparência do Lodo. 28
Tabela 3.13 - Principais Fatores que Influenciam a Eficiência do Deságue em Processos Mecânicos. 29
Tabela 3.14 - Comparação entre Métodos de Compostagem 33
Tabela 3.15 - Níveis Máximos Admissíveis de Patógenos nos Lodos de Esgoto de Classe A e B. 35
Tabela 3.16 - Níveis Máximos Admissíveis de Patógenos nos Lodos de Esgoto de Classe A e B (continuação). 36
Tabela 3.17 – Concentrações máximas permissíveis de metais em lodos de esgoto Classe A e B. 36
Tabela 3.18 - Concentrações máximas permissíveis de metais em lodos de esgoto Classe A e B (continuação). 37
Tabela 4.1 - Localidades da UGL, área total e volume de projeto associados. 40
Tabela 4.2 - Localidades da UGL, área total e volume de projeto associados (continuação). 41

Tabela 5.1 – Quantidades de lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgoto.47
Tabela 5.2 – Quantidades de lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgoto (continuação). 48
Tabela 5.3 - Tecnologias de tratamento de esgoto aplicados nas ETEs do DF e população atendida, de projeto e de 2021. 48
Tabela 5.4 - Tecnologias de tratamento de esgoto aplicados nas ETEs do DF e população atendida, de projeto e de 2021 (continuação). 49
Tabela 5.5 - Tipos de lodo gerados em cada ETE e tratamentos associados. 50
Tabela 5.6 - Quantidade de lodo de esgoto gerada por ETE em m³/mês (2022). 51
Tabela 5.7 - Comparação entre produção de lodo prevista em literatura e valores de lodo produzidos no ano de 2022. 52
Tabela 5.8 – Parâmetros analisados pela CAESB na primeira etapa. 54
Tabela 5.9 - Parâmetros analisados pela CAESB na segunda etapa. 54
Tabela 5.10 - Parâmetros analisados pela CAESB na segunda etapa (continuação). 55
Tabela 5.11 - Valores para parâmetros de análise de qualidade do lodo seco (lote de 2021). 55
Tabela 5.12 - Valores para parâmetros de análise de qualidade do lodo seco (lote de 2021) (continuação). 56
Tabela 5.13 - Características dos materiais estruturantes utilizados na compostagem aeróbia de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes. 58
Tabela 5.14 - Considerações sobre o projeto do processo de compostagem aeróbia de lodos. 60
Tabela 5.15 - Vantagens e desvantagens dos secadores térmicos. 62

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

APHA	American Public Health Association
As	Arsênio
ASB	Aterro Sanitário de Brasília
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
Cd	Cádmio
CONAM	Conselho de Meio Ambiente do DF
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal
ES	Escoamento Superficial
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Hg	Mercúrio
INFIL	Infiltração
L.An	Lagoa Anaeróbia
LAF	Lagoa Aerada Facultativa
LAMC	Lagoa Aerada de Mistura Completa
LAT	Lagoa de Alta Taxa
LF	Lagoa Facultativa
LM	Lagoa de Maturação
LP	Lagoa de Polimento
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
Ni	Níquel
NMP	Número Mais Provável
N-NH4+	Nitrogênio Amoniacal
N-NO3-	Nitrogênio Nitrato
Pb	Chumbo
pH	Potencial de Hidrogênio
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RBN	Remoção Biológica de Nutrientes
RBNR	Remoção Biológica de Nutrientes por Batelada
SD	Sólidos Dissolvidos
Se	Selênio
SF	Sólidos Fixos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SS	Sólidos Suspensos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
UFF	Unidade Formadora de Foco
UFP	Unidade Formadora de Placa
UGL	Unidade de Gerenciamento de Lodo
UNITANK	Reator Aeróbio
Zn	Zinco

1. INTRODUÇÃO

O Novo Marco Regulatório do Saneamento, aprovado em 2020, instaura a obrigação de atendimento de pelo menos 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 2033. O Distrito Federal já alcançou essa meta, atendendo 90,3% da população com coleta de esgoto e tratando 100% do que é coletado (SNIS, 2020). Ao todo, têm-se 16 ETEs em operação pela CAESB no DF, e a alta abrangência do tratamento, aliada ao alto nível de desempenho necessário nas estações para evitar eutrofização dos corpos hídricos brasilienses acarretam na produção elevada de lodo de esgoto, resíduo remanescente de cada etapa do tratamento.

O lodo de esgoto, por sua vez, vem ganhando cada vez mais destaque nos estudos de viabilidade agronômica para fertilização do solo. A natureza desse resíduo proporciona uma quantidade significativa de matéria orgânica, indicado para melhora do condicionamento do solo, além de nutrientes essenciais como nitrogênio e fósforo, que ajudam na fertilização agrícola e, dadas as devidas proporções, aliviam a necessidade do solo por fertilizantes químicos que podem a longo prazo ter efeitos negativos para a produção.

Percebe-se então a possibilidade de completar o "ciclo de vida" dos rejeitos urbanos, permitindo que os resíduos remanescentes do tratamento possam ser reinseridos no meio, evitando o acúmulo de material em aterros e possibilitando métodos menos agressivos de melhora do solo. Todavia, uma vez que o lodo de esgoto advém do tratamento de resíduos poluentes, a composição desse material também pode apresentar elementos nocivos para o meio ambiente e, em cadeia, para corpos hídricos que o rodeia. Componentes como metais pesados, micropoluentes e organismos patogênicos são motivos de atenção antes da aplicação desse material em áreas de interesse.

A CONAMA N°498/2020, bem como a CONAM N° 03/2006, que regulam o uso desse material no Brasil e no Distrito Federal, respectivamente, reconhecem não só o potencial fertilizante do lodo, mas também seu potencial poluidor, de forma que são expressos parâmetros de adequação deste para aplicação em áreas diversas e apresentados métodos de avaliação de indicadores chaves de poluição.

Métodos de tratamento do lodo, para seu deságue e higienização, já vem sendo estudados extensivamente em diversas áreas do mundo, visando garantir que este componente possa ser aproveitado da melhor forma possível. Surge enfim a necessidade de análise desses tratamentos para identificação das tecnologias que podem ser aplicáveis no

Distrito Federal, para adequação em menor prazo do lodo de esgoto a aplicações sem restrições.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como principal objetivo realizar o diagnóstico quali-quantitativo a partir de dados secundários dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) operadas pela CAESB, visando permitir o entendimento da cadeia de produção, manejo e disposição final desse resíduo sólido e propor alternativas de tratamento final com base em processos descritos na literatura, que possam proporcionar adequação deste lodo à legislação vigente no DF, a fim de permitir sua disposição final em áreas de agricultura.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a produção de lodo das Estações de Tratamento de Esgoto gerenciadas pela CAESB, a partir de dados secundários.
- Detalhar as etapas de tratamento e higienização do lodo misto manejado pela Unidade de Gerenciamento de Lodo da CAESB.
- Comparar as tecnologias de tratamento de lodo de esgoto existentes e capacidade de aplicação para a situação atual dos lodos no DF.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. PANORAMA DO TRATAMENTO DE ESGOTO NO DISTRITO FEDERAL

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB), elaborado pelo Governo Federal e aprovado inicialmente pelo Decreto N° 8.141, de 20 de novembro de 2013 (BRASIL, 2013), relata o objetivo de uma abordagem integrada do saneamento básico, incluindo quatro componentes principais: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais urbanas (MDR, 2019). Agregado a esse projeto, o Novo Marco Regulatório do Saneamento, aprovado pela Lei n° 14.026/2020, instaura a obrigação de que os contratos de prestação de serviço público de saneamento básico deverão garantir a universalização dos serviços de água e esgoto, com pelo menos 99% da população atendida com água potável e 90% atendida com coleta e tratamento de esgoto até 2033 (BRASIL, 2020).

Analisando a atual situação do Brasil nesses parâmetros, percebe-se que estas metas ainda estão longe de serem alcançadas, especialmente quando se observa o serviço de esgotamento sanitário. De acordo com dados de 2020 do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), apenas 55% da população possui atendimento total de esgoto, e desse valor apenas 50,8% do esgoto gerado passa por algum tipo de tratamento. No que se refere à situação da capital federal, todavia, a discrepância para com o país é positivamente alta, para o mesmo ano de 2020, cerca de 90,3% do esgoto produzindo no DF é coletado e 100% do coletado passa por algum tipo de tratamento antes de retornar para corpos hídricos (SNIS, 2020).

Atualmente, o Distrito Federal conta com uma população de aproximadamente 3.094.325 pessoas (IBGE, 2021). De acordo com estimativas feitas pela Agência Nacional de Água e Saneamento Básico em 2017, tendo como base a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a carga de esgoto média “per capita” gerada diariamente é de 54g DBO/hab.dia (ANA, 2017). Sabe-se aqui que, para além dos hábitos cotidianos e características locais de cada cidadão, a própria condição financeira tem grande influência na geração de esgoto, e tendo em vista a grande variação no estilo de vida da população, consequente da pandemia de COVID-19, este valor deve ser considerado, como o próprio nome indica, apenas como uma estimativa do valor real gerado, para fins de análises quantitativas. Estima-se então uma produção total de aproximadamente 167.093 kg DBO/dia para as regiões do Distrito Federal.

Seria importante destacar também que o Distrito Federal está localizado em uma área de cabeceira dos afluentes das Bacias do Rio Tocantins, São Francisco e Paraná. Dessa forma, a disponibilidade de água é questão importante e, aliada à grande urbanização e densidade populacional da região, geram a necessidade de tratamento mais aprimorado nas ETEs, para lançamento de efluentes tratados nos corpos hídricos. Exemplo disso é a necessidade de tratamento terciário robusto nas ETEs que desaguam no Lago Paranoá (ETE Sul e ETE Norte), cujas águas correm risco de eutrofização em caso de negligência e são fontes direta de abastecimento de água potável para a população.

A população do DF é atendida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), sociedade de economia mista com administração pública que gerencia 16 Estações de Tratamento de Esgoto, a Tabela 3.1/3.2 identifica os tipos de tratamento, as localidades de atendimento e corpos receptores associados a cada ETE.

Tabela 3.1 - Relação de ETE geridas pela CAESB com sistemas de tratamento associados e características associadas.

ETES	INÍCIO DE OPERAÇÃO	DESCRIÇAO DO SISTEMA	VAZÃO DE PROJETO (L/s)	LOCALIDADES DE ATENDIMENTO	CORPO RECEPTOR
ETE Brasília Sul	1962	RBN + POLIMENTO FINAL	1.500	Asa Sul/ Parte da Área Central de Brasília Núcleo Bandeirante Guará I e II Cruzeiro/ Octogonal / Sudoeste Lago Sul (parte) Riacho Fundo (Quadra QN 1) S. I. A. SCIA Águas Claras (parte) Candangolândia	Lago Paranoá
ETE Brasília Norte	1969	RBN + POLIMENTO FINAL	920	Asa Norte/ Vila Planalto/ Parte da Área Central de Brasília Lago Norte Taquari Vila Estrutural Vila Varjão	Lago Paranoá
ETE Torto (desativada)	1994	RAFA + INFIL + CLORAÇÃO	-	-	Infiltração no Solo
ETE Brazlândia	1983	L.An + LF	87	Brazlândia	Rio Verde (Goiás)
ETE Sobradinho	1967	LODO ATIVADO	196	Sobradinho (inclusive Expansões)	Ribeirão Sobradinho

Tabela 3.2 - Relação de ETE geridas pela CAESB com sistemas de tratamento associados e características associadas (continuação).

ETES	INÍCIO DE OPERAÇÃO	DESCRIÇAO DO SISTEMA	VAZÃO DE PROJETO (L/s)	LOCALIDADES DE ATENDIMENTO	CORPO RECEPTOR
ETE Vale do Amanhecer	1998	RAFA + ES + LM	35	Vale do Amanhecer, em Planaltina	Rio São Bartolomeu
ETE Planaltina	1998	RAFA/ LF + LM	255	Planaltina	Ribeirão Mestre D'Armas
ETE Paranoá	1997	RAFA + LAT	112	Paranoá e Itapuã	Rio Paranoá
ETE Samambaia	1996	RAFA/ LF + LAT + LP + POLIMENTO FINAL	284	Samambaia	Rio Melchior
ETE Alagado	1998	RAFA + LAT + ES+ POLIMENTO FINAL	154	Parte de Santa Maria	Rio Alagado
ETE Santa Maria	2000	RAFA + LAT + ES+ POLIMENTO FINAL	154	Parte de Santa Maria	Rio Alagado
ETE Gama	2003	RAFA + RBN	328	Gama	Ribeirão Ponte Alta
ETE São Sebastião	1998	RAFA + ES + LM	226	São Sebastião	Ribeirão Santo Antônio da Papuda
ETE Recanto das Emas	1998	RAFA + LAMC + LAF	246	Recanto das Emas Riacho Fundo II	Córrego Vargem da Bênção
ETE Riacho Fundo	1997	RBNB	94	Riacho Fundo I	Riacho Fundo/ Rio Paranoá
ETE Melchior	2004	RAFA + UNITANK	1.469	Taguatinga, Ceilândia, Águas Claras (parte)	Rio Melchior

Fonte: Adaptado de SIESG (2014).

Legenda:

L.An - Lagoa Anaeróbia
RBN - Remoção Biológica de Nutrientes
LAT - Lagoa de Alta Taxa
ES - Escoamento Superficial
LP - Lagoa de Polimento
LAMC - Lagoa Aerada de Mistura Completa
UNITANK - Reator Aeróbio
LF - Lagoa Facultativa
RAFA - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
INFIL - Infiltração
RBNB - Remoção Biológica de Nutrientes por Batelada
LM - Lagoa de Maturação
LAF - Lagoa Aerada Facultativa

Durante todo o processo de tratamento, a partir da remoção de nutrientes com potencial poluente da água, é produzido o que se conhece como lodo de esgoto, de forma que quanto maior for o potencial de tratamento da estação e quanto mais etapas esse tratamento tiver, maior será a quantidade e variabilidade do lodo gerado. Na Tabela 3.3, de BATISTA (2015), são apresentadas a produção média e as características associadas ao lodo produzido em cada tratamento de esgoto. Devido à grande capacidade de tratamento das ETEs e a vazão total tratada, o montante de lodo produzido também é significativo, propiciando o surgimento de uma nova problemática que seria a correta disposição desse resíduo sem que haja prejuízo ao meio ambiente.

Tabela 3.3 - Produção teórica e características do lodo em função do tipo de tratamento de esgoto utilizado na ETE.

Origem do Lodo	Produção de Lodo (gSS/hab.dia)	Teor de Sólidos (%ST)	Estabilidade	Aspecto	Desaguamento
Decantador Primário	35 a 45	2 a 6	Necessita de estabilização	Marrom a marrom escuro, aparência floculenta, odor pouco ofensivo, tende a tornar-se séptico e gerar odores rapidamente	Bom
Aeração Prolongada	38 a 45	0,8 a 1,2	Estabilizado	coloração escura, aparência floculenta, odor não ofensivo	Regular
UASB	7 a 18	3 a 6	Estabilizado		Bom
Filtro Anaeróbico (após UASB)	3 a 9	0,5 a 4	Estabilizado		Bom
Lagoas Anaeróbicas	13 a 45	15 a 20	Estabilizado		Bom
Lagoas Facultativas	20 a 25	10 a 20	Estabilizado		Bom
Lagoas de Maturação	3 a 20	10 a 20	Estabilizado		Bom
Filtro Biológico de Alta Taxa - Lodo Secundário	20 a 30	1 a 3	Necessita de estabilização	-	-
Lodo Ativado convencional	60 a 40	0,2 a 0,4	-	-	-

Fonte: Adaptado de Batista (2015).

3.2. CARACTERÍSTICA DA PRODUÇÃO DE LODO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Os sólidos remanescentes do tratamento de esgoto são produtos orgânicos que podem ser utilizados de formas positivas após estabilização por processos como a digestão anaeróbica ou compostagem. Os termos “lodo de esgoto” e “biossólidos” podem comumente serem associados como sinônimos, todavia, no ramo acadêmico também é comum que haja uma diferenciação, uma vez que “biossólido” está geralmente associado ao lodo que recebeu um ou mais tipos de tratamento para sua estabilização (COLLIVIGNARELLI *et al.* 2019).

O lodo de esgoto biológico, resultante de operações e processos de tratamento, se encontram geralmente na forma líquida ou semissólida, contendo tipicamente de 0,25 a 20% de sólido por massa, dependendo do tipo de tratamento associado (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2003)

Sabendo que a composição do lodo de esgoto será basicamente água e sólidos, é válido diferenciar os tipos de sólidos existentes. Os sólidos totais (ST) será o material restante em uma amostra após evaporação e subsequente secagem em temperatura definida, se dividem basicamente em sólidos suspensos (SS) – porcentagem dos sólidos totais da amostra aquosa que é retida em filtro - e sólidos dissolvidos (SD) – porcentagem de sólidos

em amostra aquosa que passam por um filtro com poros de 2,0 µm ou menos - ambos também podem ser separados em sólidos inorgânicos ou fixos (SF) – porcentagem restante de sólidos em amostra aquosa após secagem por tempo e temperatura determinados -, e sólidos orgânicos ou voláteis (SV) – porcentagem de sólidos perdidos de uma amostra aquosa após a secagem em tempo e temperatura determinadas (APHA, 2017). A Figura 3.1 indica a disposição dos tipos de sólidos.

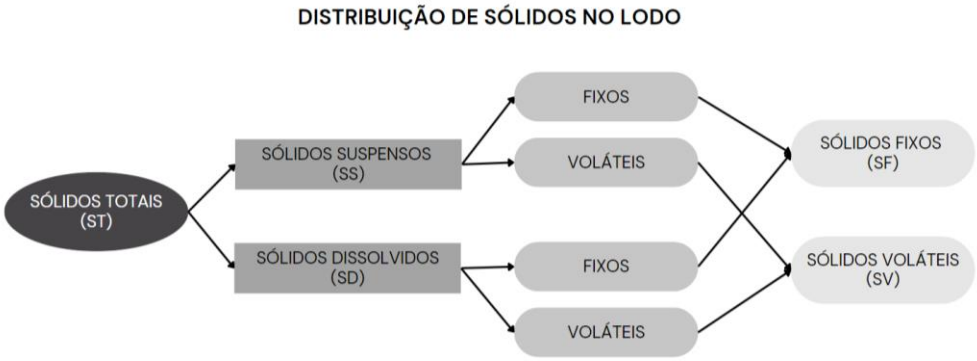


Figura 3.1 - Distribuição de Sólidos no Lodo de Acordo com Tamanho e Fração Orgânica.

A composição do lodo de esgoto doméstico possui quantidade significativa de matéria orgânica, constituída principalmente de proteínas (40-50%), gorduras (5-10%), lipídios (5-10%), fibras (5%) e carboidratos (25-50%), valores medidos indiretamente em termos de sólidos voláteis (SV) e que estão diretamente associados ao rápido crescimento populacional, urbanização, melhora na qualidade de vida e desenvolvimento econômico da região (CÁRDENAS-TALERO *et al.*, 2022). O gráfico apresentado na figura 3.2 apresenta uma média dos valores indicados por Cárdenas-Talero et. Al (2022) para melhor visualização.

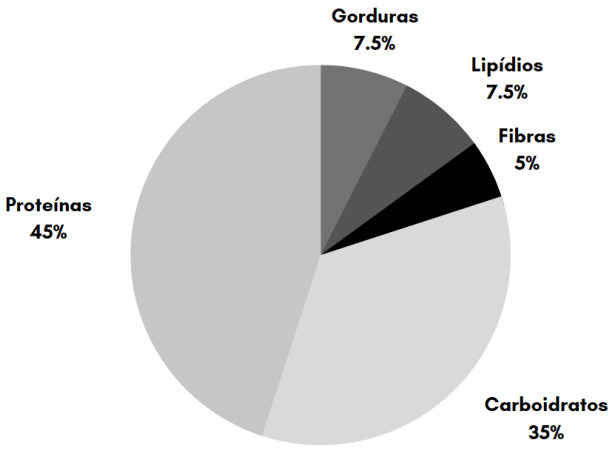


Figura 3.2 - Composição de Matéria Orgânica no Lodo de Esgotos Domésticos.

Devido também à própria origem do esgoto a ser tratado, o lodo pode conter sólidos inorgânicos e não biodegradáveis, sólidos inertes, metais, organismos patógenos, poluentes emergentes e, nutrientes de grande valor agronômico (fósforo e nitrogênio). Tais características estão diretamente relacionadas às condições do esgoto sanitário a ser tratado e dos métodos de tratamento utilizados, assim, populações mais saudáveis geram esgotos com uma quantidade significativamente menor de patógenos, sociedades cujo ambiente tem menos exposição a compostos nocivos usualmente apresentam menos concentrações de metais poluentes em seu esgoto, e há uma relação direta entre a descarga de efluentes industriais no sistema de esgotamento sanitário e a quantidade de contaminantes químicos que deverão ser condicionados (VON SPERLING *et al*., 2007).

As atuais legislações federais e distritais que regulam a disposição de lodo, a serem descritas de melhor maneira posteriormente, também especificam valores de referência para os componentes potencialmente nocivos presentes nos lodos de esgoto, visando a preservação do ambiente.

As fontes de metais pesados em efluentes urbanos estão geralmente associadas a indústrias químicas tais quais farmacêuticas, fabricantes de tinta, lavanderias, produtoras de metais, cujas descargas de esgotos ocorrem no sistema público de tratamento, além da própria corrosão do sistema de coleta de efluentes e de conexões indevidas de águas de drenagem urbana ao sistema, em especial durante o período de chuva (VON SEPRLING *et al.*, 2007; TYTLA, 2019). Exemplos de metais que podem ser identificados nos esgotos sanitários são cádmio (Cd), crômo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb), zinco (Zn), arsênio (As) e selênio (Se). A depender da concentração e tempo de exposição a muitos desses metais, perceber-se-á riscos não só ao meio ambiente, mas também à saúde humana, uma vez que há habilidade de bioacumulação na cadeia alimentar.

Cerca de 80 a 90% dos metais presentes no esgoto sanitário bruto se acumula no lodo gerado durante o tratamento, afetando o tipo de tratamento posterior necessário e suas características finais. Destaca-se aqui que as características de biodisponibilidade, mobilidade e toxicidade desses metais dependem da forma química em que se encontram, mudanças em características como pH, potencial redox e concentração de matéria orgânica interferem na capacidade de mobilidade do material e, consequentemente, metais pesados agregados aos componentes do lodo podem passar por transformações subsequentes a processos químicos, biológicos ou mecânicos usados nas estações de tratamento. O método mais comum utilizado para identificação das fórmulas químicas de metais pesados em lodos

de esgoto é o procedimento de extração química sequencial em três etapas, proposto pela Community Bureau of Reference (TYTLA, 2019).

O lodo de esgoto também contém organismos como saprófitas, comensais, simbiontes e paratitas, sendo que apenas parasitas são considerados patogênicos e causadores de doenças em seres humanos e animais. Cinco grupos específicos de organismos podem ser encontrados no lodo: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. A concentração desses patógenos depende de características como nível socioeconômico da população, condições de saneamento, região geográfica, presença de agroindústrias e tipo de tratamento do lodo. Helmintos e protozoários podem ser encontrados em forma de ovos, larvas ou cistos, exemplos desses organismos são *Ascaris lumbricoides*, *Taenia solium*, *Taenia saginata*, *Giardia lamblia* e *Cryptosporidium*, a contaminação pode ocorrer de forma direta (a exemplo da ingestão ou manuseio de solos ou vegetais contaminados com ovos viáveis de helmintos) ou de forma indireta (ingestão de água ou alimento cru cultivados com biossólidos com ovos de helmintos ou cistos de protozoários). Bactérias presentes no lodo de esgoto são provenientes da flora intestinal de humanos ou animais, solo, ar ou água contaminada, sendo sua principal fonte de contaminação oral-fecal via água ou comida, sendo exemplos *Salmonella typhi*, *Escherichia coli* e *Leptospira spp*. A concentração desses patógenos pode ser analisada na Tabela 3.4/3.5. A sobrevivência desses organismos depende de fatores como textura e pH do solo, incidência de luz solar, temperatura do ambiente, método de aplicação do lodo, capacidade de retenção de água do lodo e presença de outros microrganismos no solo (VON SPERLING *et al*, 2007.).

Tabela 3.4 - Concentração de Organismos Patogênicos em Lodos Primários e Digeridos.

Patógeno	**Tipo de Lodo**	**Densidade dos Patógenos**
Ovos de Helmintos	Lodo Primário	10^3 - $10^{4/}$ kg ST
	Lodo Digerido	10^2 - 10^3/ kg ST
	Lodo parcialmente desaguado	10^1 - 10^3/ kg ST
	Lodo de tratamentos aeróbicos parcialmente desaguado	10^2 - $7{,}5*10^4$/ kg ST
	Lodo Anaeróbico	$6{,}3*10^3$ - $1{,}5*10^4$/ kg ST
Cistos de Protozoários	Lodo Primário	$7{,}7*10^4$ - $3*10^6$/ kg ST
	Lodo Digerido	$3*10^4$ - $4{,}1*10^6$/ kg ST
	Lodo Desaguado	$7*10^1$ - 10^2/ kg ST

Tabela 3.5 - Concentração de Organismos Patogênicos em Lodos Primários e Digeridos (continuação).

Patógeno	Tipo de Lodo	Densidade dos Patógenos
Bactéria	Lodo em geral	10^1 - 8,8*10^6/ kg ST
	Lodo de Aeração Estendida	10^8/ kg ST
Vírus	Lodo Primário	3,8*10^3 - 1,2*10^5/L
	Lodo Digerido	10^1 - 10^3/L
	Lodo Biológico	10^1 - 8,8*10^6/ kg ST

Fonte: Feix and Wiart (1998), Tomaz Soccol *et al*. (1997, 2002) apud von Sperling *et al.* (2007).

Poluentes emergentes são compostos naturais ou sintéticos que, por meio de descargas pontuais ou difusas, acabam em ambientes aquáticos, geralmente em baixas concentrações. Exemplos desses poluentes são os fármacos e produtos de higiene pessoal, detergentes, hormônios esteroides, químicos industriais, pesticidas, microplásticos, entre outros (CHAVOSHAVI, 2020). Apesar dos efeitos desses compostos em ambientes aquáticos ainda não ser de total compreensão, existem indicações claras a respeito de seus impactos em forma crônica e aguda nos ecossistemas, destacando características como a sua bioacumulação, toxicidade e resistência a degradação (CHAVOSHAVI, 2020). Tais poluentes já foram detectados diversas vezes em estações de tratamento de esgotos urbanos, e como consequência, sua presença nos lodos de esgoto apresenta uma preocupação crescente e bastante atual devido aos riscos não completamente compreendidos que podem apresentar ao meio ambiente e à saúde humana. Na Tabela 3.6/3.7, de Dubey *et al.*, 2021, indicam tipos de contaminantes emergentes detectados em lodos de esgoto brutos já registrados em literaturas para diferentes países.

Tabela 3.6 - Concentração de Poluentes Emergentes Apontados em Lodos Brutos de Diferentes Países.

Tipo	Componentes	País	Concentração (ng/g)	Referências
Fármacos	Ciprofloxacina	Suiça	1.400 - 2.030	Golet et al. (2002)
		França	4	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		China	200	Jia et al. (2012)
		Suécia	5.700 - 7.700	Lindberg et al. (2006)
	Norfloxacina	Suiça	1.540 - 1.960	Golet et al. (2002)
		França	2	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		China	860	Jia et al. (2012)
		Suécia	4.700 - 5.800	Lindberg et al. (2006)

Tabela 3.7 - Concentração de Poluentes Emergentes Apontados em Lodos Brutos de Diferentes Países (continuação).

Tipo	Componentes	País	Concentração (ng/g)	Referências
Fármacos	Diclofenaco	França	1	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		Grécia	30	Samaras et al. (2013)
		China	1.720 - 11.060	Dong et al. (2016)
	Carbamazepina	França	0,036	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		China	44 - 11.060	Dong et al. (2016)
		Índia	22	Subedi et al. (2017)
	Ibuprofeno	França	0,1	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		Grécia	180	Samaras et al. (2013)
		índia	18,3 - 145	Subedi et al. (2015)
		China	58,1 - 208	Yu and Wu (2012)
	Naproxeno	Grécia	930	Samaras et al. (2013)
		China	11,1 - 35,1	Yu and Wu (2012)
		Espanha	23,8 - 72,2	Martín et al. (2012)
	Sulfametoxazol	Suiça	68.000	Gobel et al. (2005)
		Índia	31	Subedi et al. (2015)
		China	4,2	Ben et al. (2018)
	Trimetoprima	Suíça	41.000	Gobel et al. (2005)
		Índia	76 - 13	Subedi et al. (2017)
		EUA	26	McClellan and Halden (2010)
	Azitromicina	Suiça	2.500 - 64.000	Gobel et al. (2005)
		China	749	Ben et al. (2018)
		Índia	830	Clarke and Smith (2011)
Produtos Industriais	Bisfenol A (BPA)	Grécia	1.860	Samaras et al. (2013)
		Índia	2,9 - 9,8	Karthikraj and Kannan (2017)
		China	84,8 - 133,4	Yu et al. (2011)
Hormônios	Estrone (E1)	Alemanha	0,037	Ternes et al. (2002)
		China	39,2	Ben et al. (2018)
		França	27,7	Gabet-giraud et al. (2010)
	17b-estradiol (E2)	Alemanha	17	Ternes et al. (2002)
		China	2.500	Ben et al. (2018)
		França	9.600	Gabet-giraud et al. (2010)
Produtos de Higiene Pessoal	Galaxolide	Dinamarca	11.800	Chen and Bester (2009)
		Suiça	5,4 - 8,5	Ternes et al. (2005)
		UK	26	Stevens et al. (2003)
	Tonalid	Dinamarca	1.600	Chen and Bester (2009)
		Suiça	2,3 - 4,3	Ternes et al. (2005)
		UK	4	Stevens et al. (2003)
	Triclosan	França	944	Bourdat-Deschamps et al. (2017)
		Austrália	0,09 - 16,47	Ying and Kookana (2007)
		Grécia	3,39 +- 1,47	Samaras et al. (2013)
		Dinamarca	4.400	Chen and Bester (2009)

Fonte: Adaptado de Dubey *et al.*, 2021.

Ainda, quando observado o tratamento de esgoto associado, existem tipos diferentes de esgoto: primário, secundário (também conhecido como lodo biológico), misto, terciário (provenientes de tratamento avançado), e digerido. Collivignarelli *et al.* (2019) diferencia os tipos de lodo da seguinte forma:

- Lodo primário: derivado de tratamento primário de esgoto, é composto principalmente de sólidos facilmente sedimentáveis, e materiais suspensos presentes no esgoto bruto; geralmente se caracteriza pela alta capacidade de putrefação e um teor de sólidos totais (ST) variando entre 2 e 7% do peso total.
- Lodo secundário: são os resíduos que advém do tratamento biológico do esgoto (tais como processos de lodos ativados ou sistemas de biofilmes), é uma mistura heterogênea complexa, contendo microrganismos, constituintes bacterianos (ácidos nucleicos, proteínas, carboidratos e lipídios), materiais orgânicos não digeridos (papeis, resíduos de plantas, óleos, material fecal) e água. Nesta parcela, o tipo de tratamento secundário determinará a porcentagem de material inorgânico e orgânico, e geralmente a porcentagem de ST irá variar entre 0,5 e 1,5% do peso total.
- Lodo misto: é obtido quando há a mistura de tipos diferentes de lodos (como o primário, secundário e terciário), de forma que suas características dependem diretamente da proporção de cada material.

Além dessas formas principais citadas anteriormente, há o lodo terciário ou químico, formado nas etapas de polimento final. Classificam-se também os lodos em razão do seu nível de estabilidade, geralmente associado ao tipo específico de tratamento do qual é proveniente. A Tabela 3.8/3.9 identifica de forma mais completa os tipos de lodos e suas características.

Tabela 3.8 - Classificação dos Lodos de ETEs.

Tipo de Lodo	**Origem**	**Características**
Lodo primário ou bruto	Proveniente do tratamento primário do esgoto e obtido, normalmente, por sedimentação.	Possui uma coloração acinzentada, é pegajoso, de odor desagradável e pode decompor-se facilmente.
Lodo digerido	Processos de estabilização de lodos.	Apresenta redução de SSV superior a 40%, dependendo do processo empregado. Quando bem digerido não possui odor ofensivo.
Lodo aeróbio não estabilizado	Sistemas de lodos ativados e em reatores aeróbios com biofilmes – alta carga (von Sperling e Gonçalves, 2001).	Compreende a biomassa de micro-organismos aeróbios, gerada nos processos metabólicos de degradação da matéria orgânica, descartada do sistema. Necessita de processo de digestão complementar.

Tabela 3.9 - Classificação dos Lodos de ETEs (continuação).

Tipo de Lodo	Origem	Características
Lodo aeróbio estabilizado	Lodos ativados com aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilmes – baixa carga (von Sperling e Gonçalves, 2001)	Constitui o lodo excedente, resultante de respiração endógena prevalecente, com um menor teor de matéria orgânica e maior quantidade de sólidos inorgânicos, não havendo necessidade de uma etapa posterior de digestão.
Lodo anaeróbio estabilizado	Processos de degradação da matéria orgânica, em condições anaeróbias. Ocorrência em reatores anaeróbios e no fundo de lagoas de estabilização.	Lodo com menor teor de matéria orgânica, quanto melhor a digestão, menor o potencial de geração de odor.
Lodo misto	Tratamento conjunto de lodos excedentes, de origem em tratamentos primário e secundário.	Suas características são uma composição dos lodos que lhe deram origem.
Lodo químico	Produzido em estações de tratamento onde se tem uma etapa físico-químico de tratamento da fase líquida.	-

Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001); Ferreira *et al.* (1999) *apud* Batista (2015)

3.3. TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO

3.3.1. Tratamento

A presença de diversos poluentes nos lodos de esgoto, e principalmente de organismos em concentrações capazes de causar danos ao meio ambiente e à saúde humana, inferem na necessidade de tratamento do lodo antes de sua disposição final ou uso para fins agrícolas. Além disso, a remoção de água do lodo acarreta em menores volumes de rejeitos que serão tratados e dispostos, evitando desperdícios de equipamentos e mão de obra. Devido à Lei regente no Distrito Federal sobre as formas de disposição do lodo de esgoto – a ser detalhada mais a frente - a alocação para aterros sanitários não é permitida, reforçando a necessidade de tratamento para adequação aos meios de descarte possíveis. Várias etapas estão associadas a esse tratamento, e suas funções abrangem a estabilização, remoção de umidade e higienização do resíduo. Na Figura 3.3, de Cárdenas-Talero *et al.* (2022), é apresentado um fluxograma que, para cada etapa de tratamento, com exemplos de tecnologias que podem ser empregadas.

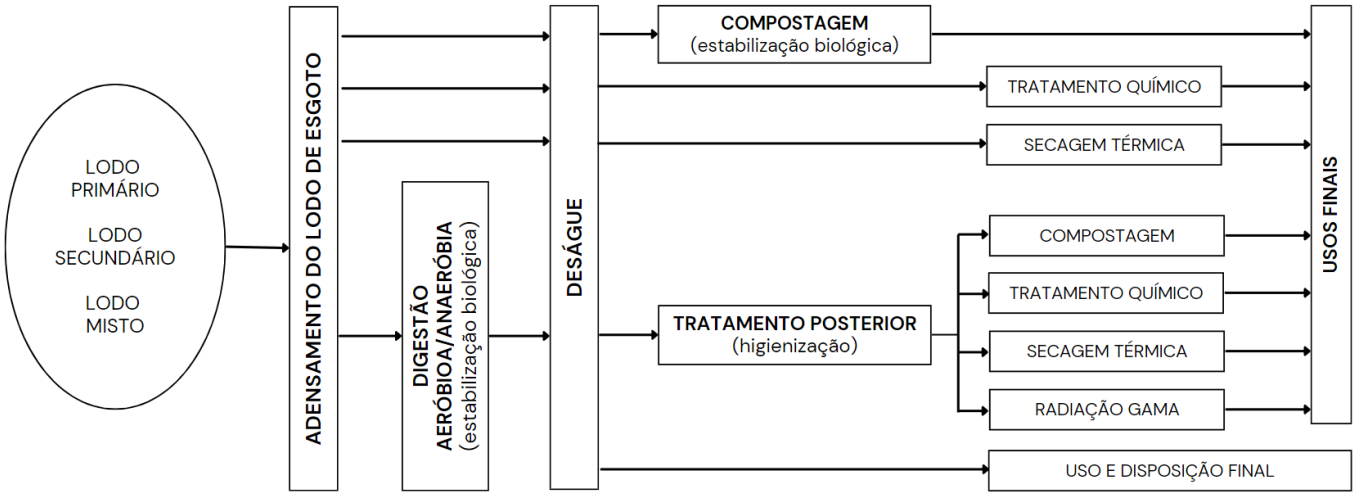


Figura 3.3 - Alternativas de Tratamento para Lodos de Esgoto.
Fonte: adaptado de Cárdenas-Talero et al. (2022).

3.3.1.1. Estabilização do lodo de esgoto

Os processos de estabilização, tal qual o nome sugere, possuem o propósito de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, de forma a reduzir o risco de putrefação, bem como minimizar a concentração de patógenos, duas características que se destacam quando o lodo se encontra em seu estado bruto. Os métodos de estabilização se dividem em térmicos, químicos e biológicos, descritos abaixo, sendo a estabilização biológica por digestão anaeróbica o método mais comumente utilizado (VON SPERLING *et al.*, 2007)

- Estabilização biológica: A estabilização biológica ocorre quando a fração biodegradável da matéria orgânica é estabilizada por bactérias específicas. Se divide basicamente entre digestão aeróbia e anaeróbia;
- Estabilização química: estabilização ocasionada pela oxidação química da matéria orgânica (pela adição de químicos);
- Estabilização térmica: a fração volátil do lodo é estabilizada pela adição de calor gerado em containers fechados hermeticamente;

Na Tabela 3.10 é apresentado um resumo das tecnologias de estabilização e disposições finais comumente associadas a cada método.

Tabela 3.10 - Tecnologias de Estabilização do Lodo e Métodos de Disposição Final

Processo de Tratamento	Método de Uso e Disposição Final
Digestão aeróbia/anaeróbia	Biossólido apropriado para uso restrito em agricultura, como condicionante de solo e fertilizante orgânico. Geralmente seguido de deságue, requer tratamentos posteriores (desinfecção) para usos na agricultura sem restrições.
Tratamento químico (estabilização alcalina)	Usado na agricultura ou cobertura diária para aterros.
Compostagem	Material comparável a solos superficiais para viveiros, horticultura e paisagismo. Uso de lodo desaguado.
Secagem térmica (peletização)	Produto com alta concentração de sólidos, concentração substancial de nitrogênio e livre de patógenos. Uso irrestrito na agricultura.

Fonte: von Sperling *et al* (2007).

Em função da presença de oxigênio livre no tratamento biológico do lodo, dois tipos de estabilização são destacados:

- Digestão anaeróbia: diversos tipos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem, simultaneamente, a matéria orgânica. Normalmente removem sólidos em suspensão (voláteis e fixos);
- Digestão aeróbia: processo de oxidação bioquímica dos sólidos biodegradáveis, pela presença de oxigênio dissolvido, favorecendo bactérias aeróbias. Sua eficiência é maior ou igual à digestão anaeróbia, em relação à diminuição de SV, sendo mais viável economicamente em sua implantação, porém com custo operacional mais elevado (PROSAB, 1999)

3.3.1.2. Remoção da umidade

A remoção de umidade é necessária para reduzir o volume de lodo que será tratado e disposto, além de facilitar suas etapas de transporte e manejo. Essa remoção ocorre em duas fases diferentes do processo de tratamento, o adensamento e o deságue do lodo. Estas etapas influenciam o processamento subsequente do lodo, visto que seu comportamento mecânico dependerá da concentração de sólidos restante (VON SPERLING *et al*, 2007.). Importante salientar também que a ligação entre a fase aquosa e os sólidos está associada a diferentes tipos de forças moleculares, que são divididas em quatro classes, de acordo com a facilidade de separação:

- Água livre: a remoção ocorre de forma simplificada, por gravidade ou flotação; o uso de tecnologias como o adensamento por gravidade, por

exemplo, permite uma diminuição do volume do lodo em 60% ou mais. Eventos como a percolação, em fases iniciais de deságue em leitos de secagem também podem ser mencionados como exemplo.

- Água adsorvida e água capilar: demanda uma quantidade maior de forças – sejam ela de origem química, uso de floculantes, ou mecânicas - agindo sobre a solução para separação dos sólidos, a exemplo do uso de centrífugas e prensas filtrantes. Nesta etapa, pode-se atingir até 30% de sólidos restantes no que se nomeia então como "torta", cuja consistência permite melhor manipulação e transportação por esteiras.
- Água molecular ou intracelular: faz parte da fase sólida, e pode ser removida apenas por meio de tecnologias termais que alterem o estado de agregação da água. Congelamento e evaporação são exemplos de possibilidades de separação. Ademais, a secagem térmica é umas das tecnologias disponíveis com maior eficiência no que diz respeito à remoção de umidade de tortas, podendo resultar em um produto final com até 95% de sólidos.

A Figura 3.4 apresenta uma relação da variação de volume do lodo em função do seu teor de água.

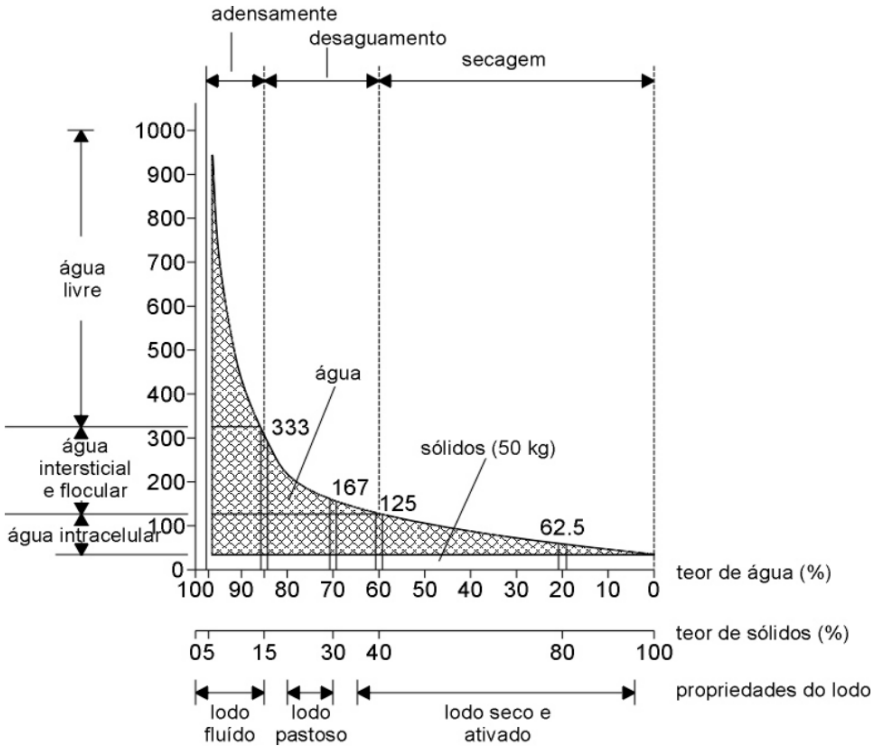


Figura 3.4 - Variação do Volume de Lodo em Função do Teor de Água. Fonte: PROSAB (1999).

3.3.1.2.1. Adensamento

O adensamento do lodo é usado principalmente em tratamentos de lodos primários e lodos ativados, influenciando no design e operação dos digestores de lodo. Possui capacidade de elevar o teor de sólidos de 1% para 2 – 2,5%, essa redução pode implicar na redução em até 50% do volume a ser disposto (PROSAB, 1999). As alternativas de adensamento se dividem em:

- Por gravidade: o adensamento por gravidade possui estrutura similar a tanques de sedimentação. Sua formatação se baseia em um modelo circular, com ralo centralizado para receber o lodo e perímetro preparado para remoção de sobrenadantes. Destaca-se aqui os princípios da zona de sedimentação e a teoria do fluxo de sólidos, de forma que o dimensionamento depende da carga hidráulica considerada e destes princípios.
- Por flotação: se refere à inserção de ar na solução, sob pressão elevada, de forma que o ar se encontre dissolvido. Quando a despressurização ocorre, este ar é liberado, formando pequenas bolhas que, ao emergirem, carregam partículas do lodo para a superfície, onde ele é removido. O uso dessa tecnologia é feito principalmente para o excesso de lodos ativados, que não são adensados satisfatoriamente em métodos de gravidade. Também é recomendado para plantas com etapas biológicas de remoção de fósforo, uma vez que há a necessidade de manter-se condições aeróbicas no lodo para evitar que o fósforo se dissolva novamente para a fase líquida. Sua eficiência costuma ser mais elevada quando comparada a métodos gravitacionais (VON SPERLING *et al.*, 2007)

3.3.1.2.2. Condicionamento

O método de condicionamento do lodo não é uma forma de remoção de umidade em si, porém é indicado principalmente para melhorar a eficiência na etapa de deságue, buscando aumentar o tamanho das partículas do lodo ao torna-los em pequenos flocos. Tal tratamento utiliza químicos orgânicos (em pó ou líquido) ou inorgânicos (como cloreto de ferro, sulfato de alumínio e cal), ou tratamentos térmicos. Seu principal objetivo é a alteração do tamanho e distribuição de partículas, permitindo uma melhora da superfície de contato e da capacidade de interação entre os componentes do lodo. Destaca-se aqui que o grau de

hidratação do lodo e sua resistência ao deságue comandam a demanda por condicionamento, que por sua vez relaciona de forma direta com a variação de tamanho da superfície específica das partículas no lodo. O método de condicionamento, então, se faz por meio de coagulação seguida de floculação, sendo usado principalmente para a preparação de lodos que passarão por processos mecânicos de deságue. A Tabela 3.11 apresenta as principais opções indicadas para condicionamento e seus efeitos em lodos mistos.

Tabela 3.11 - Efeitos de Processos Condicionantes

Item	Químicos Inorgânicos	Químicos Orgânicos	Aquecimento
Mecanismo de condicionamento	Coagulação e floculação	Coagulação e floculação	Altera propriedades da superfície, divide células, libera químicos e causa hidrólise
Efeito na carga de sólidos carregável	Permite carregamento de carga	Permite carregamento de carga	Permite carregamento significativo de carga
Efeitos no fluxo de sobrenadantes	Aumenta captura de sólidos	Aumenta captura de sólidos	Aumento significativo de cor, SS, DBO filtrada, N-NH3 e DQO
Efeito nos recursos humanos	Efeitos pequenos	Efeitos pequenos	Requer mão de obra especializada e cronograma de manutenção constante
Efeito na massa de lodo	Aumento significativo	Nenhum	Redução da massa existente, todavia pode aumentar massa por recirculação

Fonte: von Sperling *et al* (2007).

3.3.1.2.3. Desidratação

A desidratação ou deságue, geralmente no processo de digestão do lodo, também impacta diretamente em seu transporte e custos de disposição. Outra vantagem dessa etapa é o aumento da sua capacidade térmica, para casos de remoção pré-incineração. Podem ser feitos por sistemas naturais ou mecânicos.

- Por processos naturais:

  São dependentes do clima (mais indicado para regiões quentes) e costumam beneficiar lodos que passaram por processos de digestão biológica mais eficientes , devido à facilidade da drenagem e atenuação de odores.

  - Leitos de secagem:

    Neste método a água é reduzida por meio de evaporação e percolação. Utiliza-se um tanque (em áreas abertas ou com proteção contra chuva) com material drenante (para permitir a percolação), camada de suporte (permitindo melhor distribuição do lodo e evitando entupimento do material drenante) e sistema de drenagem (redireciona o líquido percolado), além de

um revestimento do solo em si com material impermeável e declividade que permita escoamento do líquido para o dreno coletor (VON SPERLING *et al* , 2007.).

Lodos bem digeridos permitem que a secagem natural resulte em características satisfatórias em menores períodos de tempo. Durante boa parte do período de secagem, a água percola facilmente para o dreno, até o momento em que o lodo se deposita no solo e sua textura se altera para uma massa pastosa, a partir desse momento a secagem será feita majoritariamente por meio da evaporação natural. O final desse processo possibilita um lodo com teor de sólidos entre 40 e 75%, de acordo com o clima e o período de secagem, supõe-se um período médio de secagem de 25 dias (PROSAB, 1999). Imhoff (1966) *apud* von Sperling *et al* (2007)., indica que a textura presente no lodo indica suas características finais e nível de digestão, como pode ser visto na Tabela 3.12, abaixo.

Tabela 3.12 - Características Associadas à Aparência do Lodo.

Aparência do lodo		**Indicações**
Lodo seco com rachaduras finas e escassas	→	Indicação de lodo bem digerido com baixa concentração de água
Grande quantidade de rachaduras com tamanho médio	→	Indicação de lodo digerido com alta concentração de água
Quantidade pequena de grandes rachaduras	→	Indicação de lodo pegajoso pouco/mal digerido, requer mais tempo de secagem

Fonte: Imhoff (1966) *apud* von Sperling *et al* (2007).

Destaca-se aqui que as condições climáticas do local terão grande influência na performance da secagem em leitos de secagem. Ademais, a exposição a luz solar promove remoção considerável de organismos patogênicos. Períodos prolongados do lodo no leito de secagem podem permitir o crescimento de vegetação.

- Lagoas de lodo:

São lagoas utilizadas para armazenamento do lodo digerido, durante sua secagem, geralmente não possuem sistemas de drenagem de fundo, mas podem ter drenagem lateral. Dessa forma, o método essencial de secagem será a evaporação, e o ciclo de secagem pode variar entre 3 e 6 meses, a depender do clima.

- Por processos mecânicos:

Usualmente os melhores métodos de deságue mecânico são feitos por prensas filtrantes, que com inclusão de diafragmas podem alcançar de 9 a 15% de ST, além de centrífugas e prensas de correia. Visto que esse tipo de secagem necessita de um pré-adensamento ou de condicionamento, os condicionantes químicos inorgânicos mais utilizados para a prensa filtrante e para filtros a vácuo são o cloreto férrico ou cal. A Tabela 3.13 indica fatores que podem influenciar a eficiência do deságue em processos mecânicos.

Tabela 3.13 - Principais Fatores que Influenciam a Eficiência do Deságue em Processos Mecânicos.

Fatores que influenciam o deságue	**Causas**
Proporções de lodo primário e secundário a serem desaguados	Lodos secundários retem duas vezes mais água que lodos primários (em kg de água/ kg ST) durante o deságue.
Tipo de lodo secundário	Quanto maior a idade do lodo, maior a quantidade de água armazenada neste. Lodos volumosos (com excesso de organismos filamentosos) retêm mais líquidos que lodos não volumosos.
Condicionamento do Lodo	Uso de químicos para condicionamento do lodo pode melhorar significativamente a performance do processo de deságue.
Tipo e idade do equipamento de deságue	Um número de variantes do mesmo equipamento de deságue podem apresentar diferentes eficiências. Equipamentos mais velhos possuem eficiência menor que equipamentos modernos.
Design e operação	O design e a operação das unidades de deságue influenciam diretamente na quantidade de ST da torta. Equipamentos operando no limite de sua capacidade tentem a produzir tortas mais úmidas (3 a 5% menos ST). Tortas mais secas são obtidas com operação de menores volumes.
Descargas industriais	Descargas industriais no sistema de esgoto podem afetar, positiva ou negativamente, a performance da etapa de deságue.

Fonte: von Sperling *et al* (2007).

- Centrífugas:

O processo de centrífuga pode ser utilizado tanto para o deságue quanto para o adensamento. Utiliza a força centrífuga para separação entre as fases líquidas e sólidas, de forma a tornar o processo mais acelerado, quando comparado com a separação por gravidade. Ocorre também a compactação do lodo, removendo parte da água ligada por capilaridade. É um processo de sedimentação que se baseia na diferença de densidade entre as partículas e o líquido. Possui-se centrífugas verticais e horizontais, sendo que as verticais são menos utilizadas devido a menor concentração de sólidos resultante. As centrífugas não emitem barulhos excessivos ou aerossóis e podem ser

instaladas em áreas abertas, apesar disso, o consumo de energia é relativamente elevado. De acordo com PROSAB (1999), possuem boa consistência de desidratação, entre 20 e 30% de sólidos, permitindo que seja manipulado como torta sólida.

- Filtros prensa:

Este tipo de tratamento opera por alimentação em bateladas (levam de 3 a 5 horas), demandando de mão de obra especializada. Destaca-se para este método obtenção de tortas com maior concentração de sólidos que as outras tecnologias, devido à alta captura de sólidos; maior qualidade do líquido efluente (devido à filtração) e baixo consumo de produtos químicos para condicionamento do lodo. PROSAB (1999) afirmam que o lodo deve estar previamente condicionado para esse processo, possibilitando uma torta com 35 a 50% de sólidos.

- Prensas desaguadoras contínuas:

Também chamadas de prensas filtrantes com correias, se divide em três zonas distintas:

- Zona de deságue por gravidade: localizado na entrada do equipamento, onde o lodo é posicionado em cima da correia e a água livre percola pelos poros desta.
- Zona de baixa pressão: ocorre leve compressão entre as correias inferiores e superiores, removendo o restante da água livre.
- Zona de alta pressão: formada por diversas roldanas de tamanhos diferentes em série, o lodo é progressivamente prensado, liberando a água intersticial.

A desvantagem desse método está na liberação de aerossóis quando estas estão abertas, barulho elevado e emissão de odores desagradáveis (a depender das características iniciais do lodo). Apesar disso, apresentam também custo inicial baixo, e consumo reduzido de energia elétrica. Este método de tratamento também exige manutenção especializada e limpezas regulares do equipamento após cada operação. PROSAB (1999) indicam um teor de sólidos da torta resultante em 15 a 20%, consistência pastosa.

- Secagem térmica:

Se apresenta como um dos métodos mais eficientes e flexíveis de redução da umidade da torta de lodo, podendo ser utilizado para lodos

primários e digeridos. Consiste no aquecimento do lodo, fechado em ambiente hermético, com evaporação e recolhimento da umidade, que é retornada para a estação de tratamento. A alta temperatura garante a eliminação de patógenos.

É comum a necessidade de algum outro tipo de deságue mecânico para adequar o lodo para concentração de sólidos entre 15 e 30%, recomendada para o uso dessa tecnologia. Neste modelo, a concentração final de umidade e sólidos totais pode ser controlada, visando adequação para a disposição pretendida. A demanda de energia dependerá da eficiência do equipamento adquirido e do tipo de lodo processado, ressaltando que parte dessa energia deverá vir de fontes externas (combustíveis fósseis, gás natural, entre outros), destacando que o biogás proveniente de digestão anaeróbia pode ser uma dessas fontes. Algumas vantagens desse método são a redução significativa do volume de lodo; estabilização do produto de forma a facilitar transportação e armazenamento; preservação de propriedades fertilizantes do biossólido; adequação do lodo para incineração ou aterros. O processo é compacto, fechado e não emite odores, todavia possui um consumo de combustível considerável, levando a considerar uso de combustíveis alternativos. Esse tipo de secagem pode resultar em teor de sólidos entre 90 e 95% (PROSAB, 1999).

3.3.1.3. Higienização do lodo de esgoto

A concentração de patógenos no lodo é substancialmente reduzida durante o processo de estabilização, todavia, processos convencionais de estabilização não afetam significativamente diversos parasitas intestinais (em especial ovos desses parasitas), acarretando na necessidade de tratamentos complementares para garantir inativação por completo. É válido ressaltar que o nível de higienização necessário para o resíduo depende principalmente da destinação final e de suas características iniciais. A inativação desses organismos pode ocorrer por meio de processos térmicos, químicos ou biológicos (também por combinação desses processos).

Os principais processos de remoção de patógenos, de acordo com von Sperling *et al.* (2007), são:

- Tratamento térmico:

  As duas principais características para redução de organismos patogênicos de forma térmica são o tempo de detenção do lodo e a temperatura empregada. Deve-se considerar também a relação entre a organização dos sólidos no lodo e como estes estão em contato com a transferência de calor, visto que lodos mais concentrados geram mais dificuldade no fluxo de calor.

- Tratamento químico:

  O aumento de pH, por meio de produtos alcalinos, por exemplo, incide em alterações coloidais na célula dos patógenos e proporciona um ambiente inóspito. A associação com temperaturas elevadas também pode acelerar esse processo de inativação.

- Tratamento biológico:

  Exemplo desse tratamento é a vermicultura, em que o resíduo orgânico é consumido por minhocas dentrívoras, excretando húmus com boas características agronômicas e fácil assimilação para plantas. O processo de ingestão de patógenos presentes no lodo proporciona sua inativação por meio da atividade gástrica das minhocas. Vale salientar que alguns componentes presentes no lodo, como amônia e dióxido de carbono podem ser prejudiciais para esses anelídeos, ocasionando sua morte.

- Tratamento por radiação ou solarização:

  Também por meio da desnaturação das células dos organismos patógenos, radiações como beta e gama são utilizadas para tratamento do lodo. A eficiência dependerá principalmente na dose de radiação aplicada, além da espessura da camada de lodo afetada (para radiações do tipo beta). As radiações gama possuem maior penetração, podendo ser combinada com métodos de deságue tais como prensas com correias. A concentração de matéria orgânica não será afetada pela radiação, de forma que se deve atentar à possibilidade de ressurgimento de patógenos por reinfecção. Pode-se destacar em especial a radiação ultravioleta (possibilitada também pela radiação solar), e sua capacidade bactericida.

Sobre os principais métodos biológicos de redução de patógenos:

- Compostagem:

  Se refere à decomposição aeróbica de matéria orgânica, por meio de condições controladas de temperatura, umidade, oxigênio e disponibilidade de nutrientes. A inativação de patógenos ocorre devido ao processo térmico decorrente

da alta metabolização dos microrganismos. Tanto lodo bruto quanto digerido pode ser compostado, porém é necessário a adição de folhas, resíduos verdes, galhos, ou outros agentes que melhorem a retenção de umidade, aumentem a porosidade e o balanço entre carbono e nitrogênio. O resultado desse processo é um condicionante de solo com boa qualidade agronômica. Parâmetros que devem ser controlados para a ocorrência da compostagem são a relação carbono/nitrogênio, estrutura física do lodo, relação de umidade, aeração do processo, temperatura e pH. Exemplos de métodos de compostagem são apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Comparação entre Métodos de Compostagem

Métodos de Compostagem	**Vantagens**	**Desvantagens**
Leiras	Baixo custo de investimento Baixo custo de operação e manutenção	Requer grandes áreas Possibilidade de problema com odores Dificuldade em atingir as temperaturas necessárias Problemas de mistura potenciais Período de compostagem longo
Pilha estática aerada	Melhor controle de odor Melhores condições de manutenção de temperatura Menor tempo de reação	Investimentos para o sistema de aeração Custos moderados para operação e manutenção
Sistema Em-vaso	Baixa necessidade de áreas Alto grau de controle no processo Facilidade de controle de temperaturas e odores	Alto investimento e operação e manutenção Apenas aplicável economicamente em larga escala

Fonte: von Sperling *et al*.(2007).

- Digestão aeróbica termofílica autotermal:

  Atua em formato parecido com sistemas aeróbicos convencionais de digestão, todavia em caráter termofílico. Utilizando o lodo adensado, reações aeróbicas liberam calor sobre o lodo, removendo parte considerável de SSV e dos patógenos. Aeração e revolvimento do lodo são fatores chave para a implementação de oxigênio no sistema. Para lodos corretamente estabilizados, não se espera problemas com odor indesejável ou reaparecimento de patógenos.

- Estabilização alcalina ou caleação:

  Usado para tratamento de lodos primários, secundários ou digeridos, tanto desaguados ou líquidos. Busca-se níveis elevados de pH, por meio da adição de cal, que proporcionarão a redução de organismos e a possibilidade de ocorrência de odores, apesar da possibilidade de odores indesejados pela remoção de amônia. A matéria orgânica presente no lodo não será afetada, de forma que a disposição do

lodo tratado deve ser feita o mais brevemente possível, evitando recorrência de odores ou patógenos. A adição de cal também aumentará o volume do resíduo a ser disposto, afetando transporte e custos com disposição. Apesar disso, é um método simples e de baixo custo de investimento, sendo indicada para pequenas estações de tratamento ou mesmo para casos emergenciais.

- Pasteurização:

  Será o aquecimento do lodo a temperatura bastante elevadas, seguido de imediato resfriamento. Uma forma frequente de aumento da temperatura seria por meio da injeção de vapor aquecido em bateladas de lodo, diminuindo o risco de recontaminação. Há ressalvas para o uso desse método sem tratamentos posteriores devido à possibilidade de reaparição de *Salmonella*. Outro fator a ser considerado é o odor forte após o tratamento termal.

- Secagem térmica:

  Neste tratamento o lodo segue por uma fonte de calor que visa evaporar a água do resíduo e, consequentemente, inativar os organismos. O lodo que passará por secagem térmica deve está corretamente digerido e desaguado em cerca de 20 a 35% de sólidos totais, para que a operação seja economicamente viável. A secagem térmica pode ser de contato direto (encontro entre o ar quente e o lodo) ou de contato indireto (transmissão do calor por placas), ambos os sistemas necessitam de ambiente fechado e tratamento posterior da água e poeira liberadas pelos secadores.

3.3.2. Disposição

Existem diversas alternativas de disposição final possíveis para o lodo de esgoto, entre elas a disposição em aterros sanitários, incineração e reciclagem agrícola.

Em aterros sanitários, há o confinamento do lodo em células recobertas por terra, diminuindo a concentração de oxigênio e, consequentemente, acarretando na produção de metano. A percolação de água da chuva pelo lodo, ou da própria água ainda existente no lodo disposto, caso não haja um bom controle do aterro e fiscalização do lençol freático, podem resultar no carreamento de metais pesados e contaminantes orgânicos para os ambientes aquáticos. Os gases produzidos nesse processo devem ser drenados, podendo ser queimados ou liberados na atmosfera. Sendo este método de disposição desestimulado devido ao acúmulo de resíduo, e impossibilitado na região do Distrito Federal devido à quantidade de lodo produzida diariamente pelas ETEs e o teor de umidade presente, diante da capacidade de operação e manutenção do Aterro Sanitário de Brasília (ASB).

A incineração utiliza a decomposição térmica via oxidação, para reduzir ou eliminar a toxicidade dos resíduos, é uma possibilidade com elevado custo operacional e exige um alto controle para evitar poluição atmosférica. O produto dessa incineração são as cinzas, de forma a ser indicada para lodos incapacitados de alocação em agricultura, geralmente devido à presença de metais pesados (PROSAB, 1999)

A reciclagem agrícola promove a recirculação de nutrientes para o solo e, quando feita seguindo critérios seguros de aplicação, são extremamente positivas para o ambiente, diminuindo a necessidade de fertilizantes químicos excessivos e renovando a terra. Ressalta-se aqui a necessidade de fiscalização e seguimento de normas para que esse tipo de disposição não tenha efeitos negativos.

Atualmente no Distrito Federal existem duas normas que regem a disposição de lodos de esgoto:

- RESOLUÇÃO CONAMA N° 498, de 19 de agosto de 2020 - Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências (Responsável pela revogação da CONAMA 375/06).
- RESOLUÇÃO CONAM N° 03, de 18 de julho de 2006 - Disciplina o Uso do Lodo de Esgoto no Distrito Federal e dá outras providências;

Das normas apresentadas, pode-se dar atenção principalmente aos artigos 8º ao 11 da CONAM 003/06, que apresentam as características necessárias para classificação do lodo como Classe A, B ou C. As Tabelas 3.15 e 3.16 apresentam, de acordo com o artigo 8° da resolução, o nível máximo admissível de cada patógeno nos lodos para cada classificação como Classe A ou Classe B.

Tabela 3.15 - Níveis Máximos Admissíveis de Patógenos nos Lodos de Esgoto de Classe A e B.

Lodo de Esgoto Classe A	
Parâmetro	**Máximo admissível**
Coliformes termotolerantes	103 NMP*/g de matéria seca
Ovos viáveis de helmintos	menor que 1 ovo a cada 4g de matéria seca
Salmonella sp.	ausência em 10g de matéria seca
Vírus entéricos	menor que 1 UFP** ou UFF*** por 4g de matéria seca
Cistos viáveis de protozoários	menor que 1 a cada 4g de matéria seca

Tabela 3.16 - Níveis Máximos Admissíveis de Patógenos nos Lodos de Esgoto de Classe A e B (continuação).

Lodo de Esgoto Classe B	
Parâmetro	**Máximo admissível**
Coliformes termotolerantes	2x10^6 NMP/g de matéria seca

*NMP: Número mais provável; ** UFP: Unidade Formadora de Placa; ***UFF: Unidade Formadora de Foco;

Fonte: CONAM (2006).

A norma também apresenta, no artigo 9°, os parâmetros e concentrações de elementos que devem ser medidos por meio de métodos analíticos e amostragens indicadas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, para a caracterização físico-química do lodo de esgoto. Sendo eles:

- Parâmetros: teor de umidade, sólidos totais e voláteis e pH (água);
- Nutrientes: carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio amoniacal (N-NH4+), nitrogênio nitrato (N-NO3-), nitrogênio Kjeldahl (N-orgânico + n-nh4+), potássio e sódio;

  Metais: alumínio, antimônio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo total, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco;
- Compostos orgânicos persistentes conforme CONAMA e demais normas federais.

A tabela 3.17/3.18 indica as concentrações máximas de metais permitidas pela resolução, em seu artigo 10, para as Classes de lodo A e B.

Tabela 3.17 – Concentrações máximas permissíveis de metais em lodos de esgoto Classe A e B.

Elemento	**Concentração máxima permitida no lodo de esgoto até sete anos após a publicação desta norma**	**Concentração máxima permitida no lodo de esgoto a partir de oitavo ano após a publicação desta norma**
Arsênio	20	20
Bário	1300	650
Cádmio	26	13
Cobre	1500	1000
Chumbo	500	250
Cromo	1000	500
Mercúrio	15	4

Tabela 3.18 - Concentrações máximas permissíveis de metais em lodos de esgoto Classe A e B (continuação).

Elemento	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto até sete anos após a publicação desta norma	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto a partir de oitavo ano após a publicação desta norma
Molibdênio	50	25
Níquel	420	210
Selênio	50	8
Zinco	3000	2000

* Concentrações limite – base seca (mg kg-1)

Fonte: CONAM (2006).

Além disso, o artigo 11 da norma afirma que, para evitar a atração de vetores, também é requisitado teor de cinzas nos lodos Classe A e B superiores a 25% na base seca. Destaca-se aqui que um lodo de esgoto é considerado Classe C quando não atender as especificações das Classes A e B.

Outros artigos de grande relevância, uma vez especificada a classificação do lodo, é o Art. 42 e Art. 43, também da CONAM 003/06, referente às culturas aptas a serem adubadas com lodo de esgoto. O Artigo 42, citado em íntegra, indica os usos principais que podem ser associados a cada classe de lodo:

> Art. 42 – Só será permitido o uso do lodo de esgoto na produção vegetal se houver compatibilidade entre a Classe do lodo de esgoto e a cultura pretendida, conforme abaixo especificado.
>
> I – Lodo de esgoto Classe A, sem registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, é permitido para:
>
> a – Grandes culturas: principalmente aquelas em que os produtos são consumidos após a industrialização ou alimentos não consumidos in natura, tais como milho, feijão, soja, sorgo, canola, trigo, aveia, cevada, forrageiras para adubação verde e outras similares.
>
> b – Reflorestamento e revegetação de áreas mineradas: espécies arbóreas, exóticas e nativas.
>
> c – Produção de mudas arbóreas e arbustivas.
>
> d – Produção de grama: incorporando ao solo no mínimo 3 (três) meses antes da retirada das leivas.

e – Fruticultura: na implantação dos pomares quando o lodo de esgoto for incorporado em covas. Para adubação de manutenção o lodo de esgoto deve ser aplicado em época anterior à frutificação.

f – Floricultura: apenas para plantas de corte.

II – Lodo de esgoto Classe B é permitido para:

a - Grandes culturas: principalmente aquelas em que os produtos são consumidos após a industrialização ou alimentos não consumidos in natura, tais como milho, feijão, soja, sorgo, canola, trigo, aveia, cevada, forrageiras para adubação verde e outras similares, desde que aplicado de forma mecanizada.

b - Reflorestamento e revegetação de áreas mineradas: espécies arbóreas, exóticas e nativas.

c – Fruticultura: na implantação dos pomares quando o lodo de esgoto for incorporado em covas.

III – Lodo de esgoto Classe C:

a – É proibido na produção de alimentos, seja qual for o porte ou hábito da planta.

b – É permitido para reflorestamento e revegetação de áreas mineradas – espécies arbóreas, exóticas e nativas. (CONAM, 2006).

Por fim, por meio do artigo 43, permite-se o uso de lodos de esgoto Classe A, B e C em quaisquer culturas para fins de pesquisa, desde que cumpra os preceitos de segurança desta norma e demais legislações aplicáveis (CONAM, 2006).

4. METODOLOGIA

Esse trabalho foi desenvolvido a partir das Etapas apresentadas no Fluxograma da Figura 4.1. Destaca-se o caráter de diagnóstico e exploratório do trabalho que buscou compreender as dinâmicas de geração, tratamento e disposição final dos lodos gerados nas ETE operadas pela CAESB e levou em consideração as diferentes tecnologias de tratamento de esgoto sanitário aplicadas nas 16 ETEs. A partir desse entendimento e de estudos das tecnologias de tratamento de lodo listadas na literatura apresentou-se uma compilação de opções de sistemas que possam ser estudados, em trabalhos posteriores, de forma aprofundada, como opções para o tratamento dos lodos gerados na CAESB.

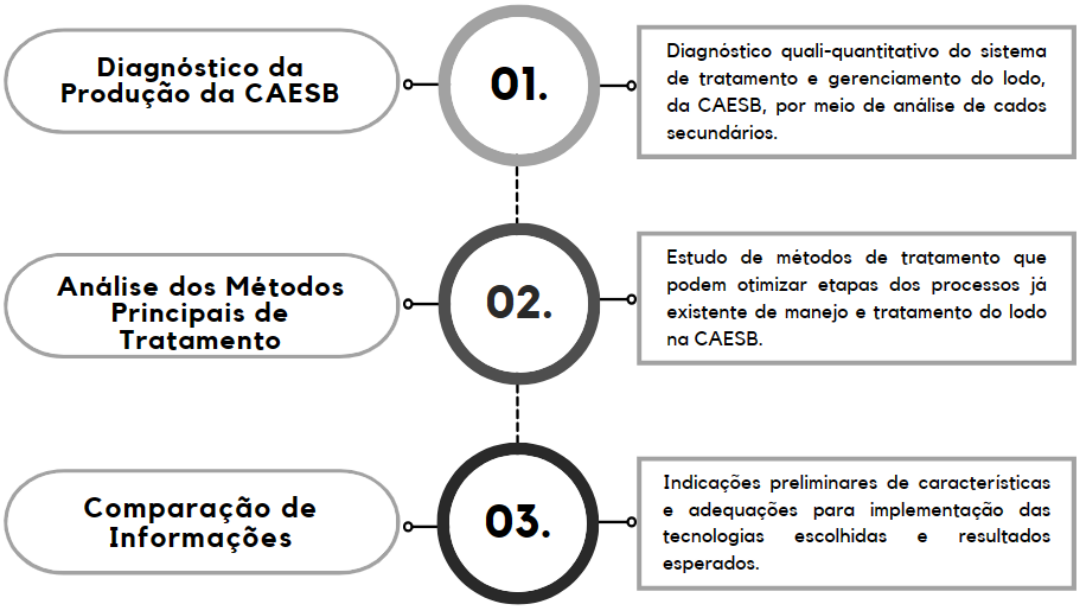


Figura 4.1 - Fluxograma das Etapas do Projeto Final.

4.1. DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO DE LODO NO DF E CARACTERÍSTICAS

O diagnóstico da produção, do tratamento e da destinação final dos lodos gerados pelas ETE operadas pela CAESB foi realizado por meio de série histórica de dados secundários de caracterização do lodo bruto, entre os anos 2020 e 2022, e após as etapas já implementadas de tratamento utilizadas pela empresa, além de visitas técnicas à Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) para o entendimento do tratamento e adequação do lodo antes de sua disposição final.

A UGL é formada por 25 baias de estocagem com área total de 145.978m², 6 pátios para solarização/estocagem de lodo com área total de 114.211m², além de 4 galpões de armazenamento com área total de 9.881m² e uma lagoa de equalização/acumulação dos

líquidos drenados das baias com área de 6796m² e capacidade de armazenamento de 27.565,2m³. As áreas e volumes de projeto associados a cada local estão apresentadas na Tabela 4.1/4.2. Na Figura 4.2 pode-se observar uma imagem de satélite, obtido pelo programa QGIS, da UGL e de suas áreas de tratamento.

Tabela 4.1 - Localidades da UGL, área total e volume de projeto associados.

Local	**Área (m²)**	**Volume de Projeto (m³)**
Baia 1ª	2650	3153,2
Baia 1B	4939	4976,2
Baia 2ª	5357	6571,6
Baia 2B	6604	6668,2
Baia 2C	7118	6580,0
Baia 2D	6948	7056,3
Baia 2E	6415	7305,4
Baia 3ª	3197	4377,8
Baia 3B	6575	6221,5
Baia 3C	7731	6813,5
Baia 3D	7687	7148,3
Baia 3E	6739	7587,1
Baia 4ª	4760	5965,9
Baia 4B	3676	5022,2
Baia 4C	9358	8944,1
Baia 4D	8123	7817,4
Baia 5ª	6301	6958,9
Baia 5B	6109	7064,0
Baia 5C	5954	7303,2
Baia 5D	5993	7222,9
Baia 5E	3712	3960,4
Baia 6ª	4142	6199,6
Baia 6B	4666	7031,6
Baia 6C	5653	7831,1
Baia 6D	5571	8562,7
Total Baias	**145978**	**164343,1**
Pátio A	21312	42623,6
Pátio B	17977	89884,0
Pátio C	25098	125491,9
Pátio D	23906	119531,1
Pátio E	13121	26242,4
Pátio F	12797	25594,8
Total Pátios	**114211**	**429367,8**

Tabela 4.2 - Localidades da UGL, área total e volume de projeto associados (continuação).

Local	Área (m^2)	Volume de Projeto (m^3)
Galpão G1	2623	5246,6
Galpão G2	2640	5279,2
Galpão G3	2735	5470,0
Galpão G4	1883	3766,0
Total Galpões	**9881**	**19761,8**
Lagoa de Equalização	**6796**	**27565,2**

Fonte: CAESB (2023).

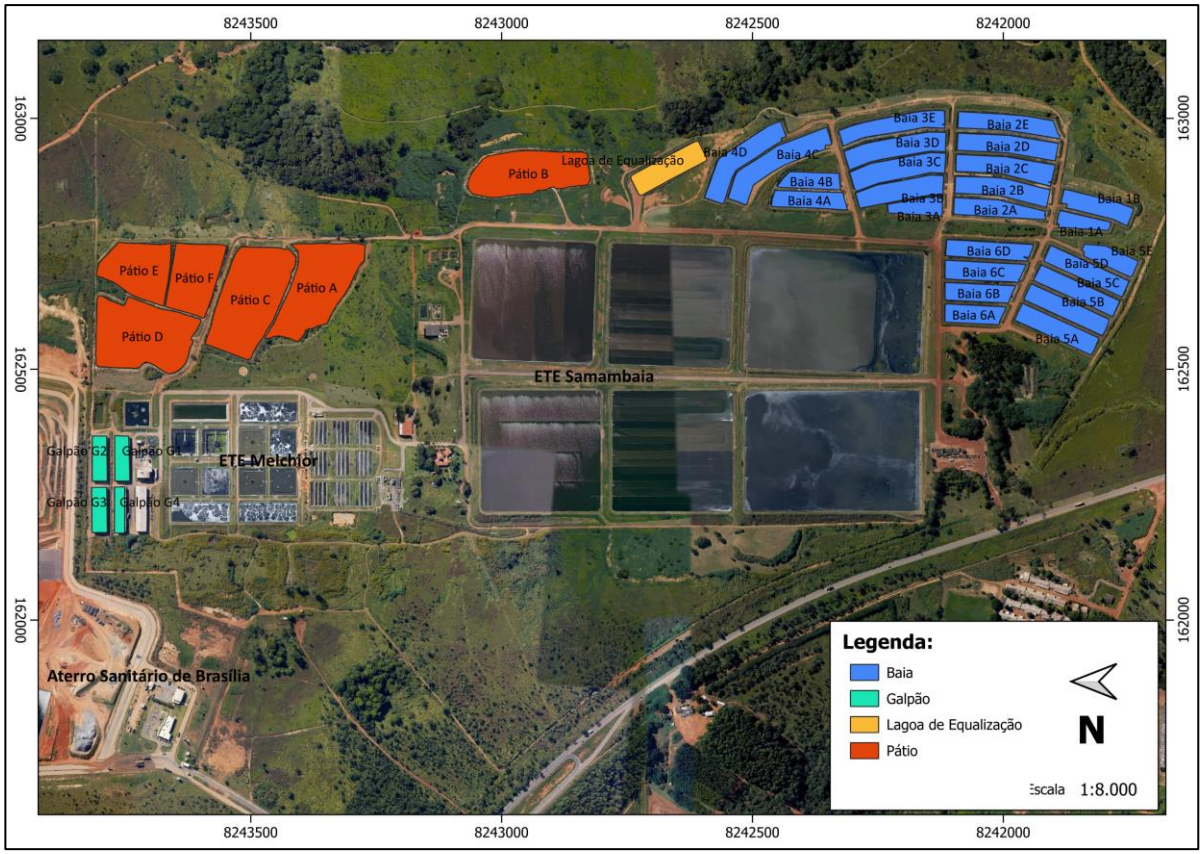


Figura 4.2 - Unidade de Gerenciamento de Lodo, Samambaia-DF.

As baias servem para armazenamento do lodo desaguado produzido pelas ETEs durante o período chuvoso (setembro/outubro a abril/maio), tais baias possuem inclinação com quedas para taludes laterais, onde se localiza o sistema de drenagem constituído por tubulação de esgotamento, possibilitando remoção do líquido drenado de forma satisfatória. O perfil típico da bacia de secagem de lodo e detalhes da caixa de manobra de líquidos drenados e chorume podem ser vistos na Figura 4.3.

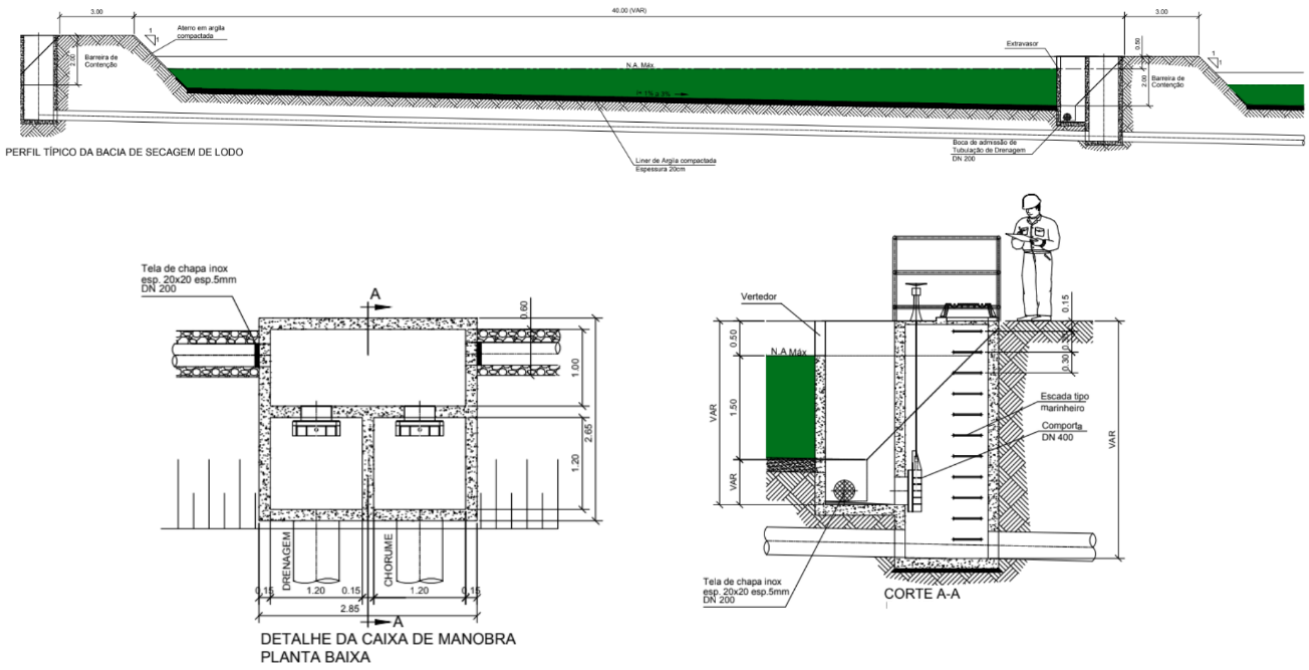


Figura 4.3 - Perfil típico da baia de secagem de lodo e Detalhe da caixa de manobra em planta baixa e corte. Fonte: CAESB (2023).

O armazenamento de lodo nas baias é feito por meio de empilhamento em leiras dispostas de forma a estabelecer sulcos no solo, conduzindo a água pluvial para fora do material acumulado, no sentido da queda até a tubulação de drenagem lateral da baia (CAESB, 2022). A Figura 4.4 apresenta uma baia de estocagem.



Figura 4.4 - Baias de Estocagem

O líquido drenado pelas baias é direcionado à lagoa de equalização. Uma elevatória permite que o sistema de recalque do líquido armazenado seja realizado por bombeamento

automático (CAESB, 2021.2). O destino do chorume pode ser controlado por meio de manobras nas tubulações que levam para a ETE Melchior ou Samambaia, em momentos de menor vazão da ETE a se direcionar. Não há medição do volume de chorume gerado. A Figura 4.5 apresenta a Lagoa de Equalização.



Figura 4.5 – Lagoa de Equalização

Apenas durante o período de estiagem, o lodo das baias e lodo da produção diária das ETEs são espalhados nos pátios de secagem para serem submetidos ao processo de solarização. A Figura 4.6 apresenta um pátio de secagem.



Figura 4.6 – Pátios de Secagem

Neste processo, associado ao espalhamento do lodo, é feito também o seu revolvimento – para auxiliar no contato com a luz solar e consequentemente na redução de volume e de patógenos – por meio de tratores, grades niveladoras e enxadas rotativas, como pode ser visto na Figura 4.7. O principal gasto associado à solarização estará associado, além do transporte de lodo das ETEs para a UGL e internamente na UGL, ao uso desses maquinários específicos durante o tratamento desse material.



Figura 4.7 – Revolvimento do lodo por trator durante solarização.

De forma a liberar espaço dos pátios de secagem, o lodo já seco é então armazenado nos galpões até que seja destinado (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Galpões de Armazenamento

Em um contexto geral, o caminho de tratamento do lodo dentro da UGL pode ser visto no Fluxograma da Figura 4.9.

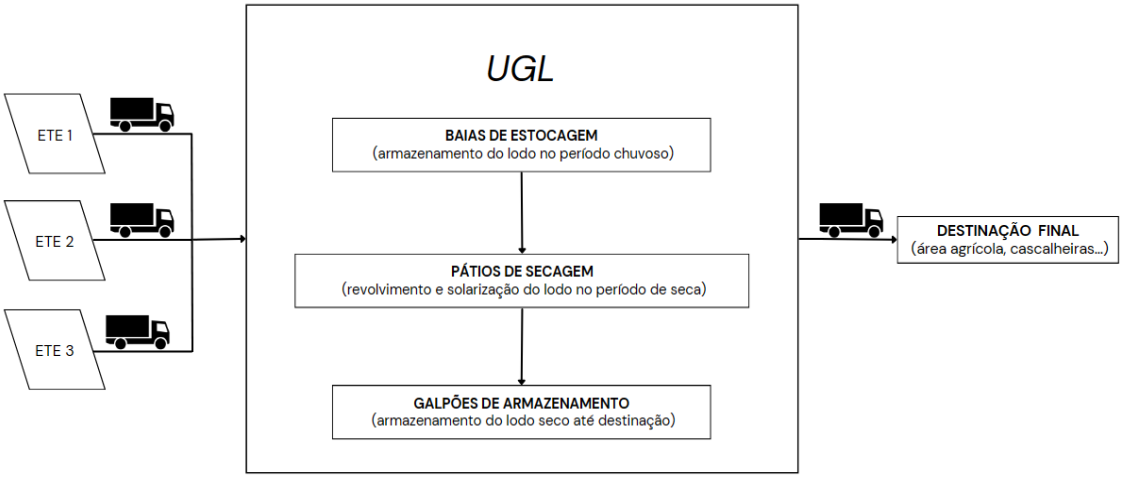


Figura 4.9 – Caminho percorrido pelo lodo desde a ETE até sua destinação final.

Foi importante para análise estabelecer os fluxos de geração de lodo, considerando as características qualitativas e quantitativas, bem como a relação entre os sistemas de tratamento de esgoto (não apenas da UGL, mas também os tratamentos internos de lodo nas próprias ETEs) e o lodo gerado. Os dados foram comparados com valores teóricos estabelecidos na literatura clássica. Ademais, destaca-se a análise da produção de lodos nas ETEs Brasília Sul, Brasília Norte e Melchior, que possuem as maiores produções de lodo.

4.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS PRINCIPAIS DE TRATAMENTO

A revisão da literatura sobre o tratamento de lodo de esgoto objetivou o entendimento de tecnologias que ofereçam melhores vantagens de tratamento de lodo, seja em custos energéticos, período de tratamento ou área utilizada para tratamento, para considerar a possibilidade de implementação dessas tecnologias no processo já existente de tratamento de lodo de esgoto de Brasília, gerenciado pela UGL. Dos tipos de tratamento supracitados na bibliografia deste trabalho, optou-se pela exploração de dois métodos de tratamento de lodo que, com estudos mais aprofundados e análises experimentais, possuem capacidade de se apresentar como possíveis alternativas viáveis para implementação: a compostagem e a secagem térmica.

4.3. COMPARAÇÃO DE INFORMAÇÕES

Por fim, compilaram-se os possíveis problemas associados a cada tipo de tratamento e custos de implantação e operação destes, visando a área do Distrito Federal e as especificidades correlatas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DISPOSIÇÃO DO LODO NA UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO (UGL)

Tendo conhecimento das Estações de Tratamento de Esgoto gerenciadas pela CAESB, bem como seu princípio de operação e áreas atendidas, explicitados anteriormente na Tabela 3.1.1, pode-se então analisar os dados atuais associados às suas produções de lodo. Inicialmente deve-se ter conhecimento do montante de lodo que se espera produzir para cada tipo de tratamento, de acordo com a literatura, para que se possa comparar com os valores obtidos das ETEs do DF, e inferir se os tratamentos estão ocorrendo de maneira satisfatória. A Tabela 5.1/5.2, adaptada de VON SPERLING (2007), apresenta quantidades de lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgoto.

Tabela 5.1 – Quantidades de lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgoto.

Sistema de Tratamento de Esgoto	Massa de lodo produzida (gSS/hab.dia)	Volume de lodo produzido (L/hab.dia)
Tratamento Primário (convencional)	35 - 45	0,6 - 2,2
Tratamento Primário (tanques sépticos)	20 - 30	0,3 - 1,0
Lagoa Facultativa	12 - 32	0,1 - 0,25
Lagoa Anaeróbica – Lagoa Facultativa		
• Lagoa anaeróbica	20 - 45	0,1 - 0,3
• Lagoa Facultativa	6 - 10	0,05 - 0,15
• Total	26 - 55	0,15 - 0,45
Lagoa Aerada Facultativa	8 - 13	0,08 - 0,22
Mistura Completa Aerada/ Lagoa de Sedimentação	11 - 13	0,15 - 0,25
Tanque Séptico + Filtro Anaeróbico		
• Tanque Séptico	20 - 30	0,3 - 1,0
• Filtro Anaeróbico	7 - 9	0,2 - 1,8
• Total	27 - 39	0,5 - 2,8
Lodos Ativados Convencional		
• Lodo Primário	35 - 45	0,6 - 2,2
• Lodo Secundário	25 - 35	2,5 - 6,0
• Total	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos Ativados – Aeração Estendida	40 - 45	3,3 - 5,6

Tabela 5.2 – Quantidades de lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgoto (continuação).

Sistema de Tratamento de Esgoto	Massa de lodo produzida (gSS/hab.dia)			Volume de lodo produzido (L/hab.dia)		
Filtro Biológico de Alta Taxa						
• Lodo Primário	35	-	45	0,6	-	2,2
• Lodo Secundário	20	-	30	0,8	-	3,0
• Total	55	-	75	1,4	-	5,2
Biofiltro Aerado Submergido						
• Lodo Primário	35	-	45	0,6	-	2,2
• Lodo Secundário	25	-	35	2,5	-	6,0
• Total	60	-	80	3,1	-	8,2
Reator UASB	12	-	18	0,2	-	0,6
UASB + Pós-tratamento Aeróbico						
• Lodo Anaeróbio (UASB)	12	-	18	0,3	-	0,6
• Lodo Aeróbio (pós-tratamento)	8	-	14	0,2	-	0,5
• Total	20	-	32	0,5	-	1,1

Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2007).

Sabe-se ainda que a população de projeto das ETEs poucas vezes coincide com o verdadeiro montante de habitantes atendidos, seja por ainda não ter atingido o tempo de projeto ou seja por ter ultrapassado as previsões de crescimento populacional. Dessa forma, também é importante conhecer a população que está efetivamente sendo atendida. A Tabela 5.3/5.4, adaptada de CAESB (2021.1) retoma o tipo de tratamento associado a cada ETE do DF e apresenta a estimativa de população atendida por elas até o ano de 2021.

Tabela 5.3 - Tecnologias de tratamento de esgoto aplicados nas ETEs do DF e população atendida, de projeto e de 2021.

Bacia Hidrográfica	Estações de Tratamento de Esgoto do DF	Tecnologia de tratamento empregada	População Atendida	
			Projeto	Em 2021
Bacia Paranoá	ETE Brasília Sul	RBN + Polimento Final	460.000	487.628
	ETE Brasília Norte	RBN + Polimento Final	250.000	163.494
	ETE Riacho Fundo	RBNB	43.000	34.055

Tabela 5.4 - Tecnologias de tratamento de esgoto aplicados nas ETEs do DF e população atendida, de projeto e de 2021 (continuação).

Bacia Hidrográfica	Estações de Tratamento de Esgoto do DF	Tecnologia de tratamento empregada	População Atendida	
			Projeto	Atual
Bacia Paranoá (continuação)	ETE Planaltina	RAFA/ LF + LM	138.000	114.437
	ETE Vale do Amanhecer	RAFA + LAF + LM	15.000	19.834
	ETE Paranoá	RAFA + LAT	60.000	96.215
	ETE São Sebastião	RAFA + ES + LM	77.800	75.817
Bacia Ponte Alta/ Alagado	ETE Gama	RAFA + RB + Clarificador	182.630	121.509
	ETE Santa Maria	RAFA + LAT + ES + PF	84.852	41.771
	ETE Alagado	RAFA + LAT + ES + PF	84.852	77.673
	ETE Recanto das Emas	RAFA + LAMC + LAF	125.500	160.978
Bacia Melchior	ETE Samambaia	RAFA/ LF + LAT + LP + PF	180.000	191.818
	ETE Melchior	RAFA + UNITANK	896.799	577.031
	ETE Brazlândia	L. An + LF	29.600	44.629

Fonte: Adaptada de CAESB (2021)

Legenda:

RBN – Remoção Biológica de Nutrientes
RBNB – Remoção Biológica de Nutrientes por Batelada
RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RB – Reator Biológico
ES – Escoamento superficial
INFIL - Infiltração
L.An – Lagoa anaeróbia
LAF – Lagoa Aerada facultativa
LAMC – Lagoa Aerada de Mistura Completa
LAT – Lagoa de Alta Taxa
LF – Lagoa facultativa
LM – Lagoa de Maturação
LP – Lagoa de Polimento
UNITANK – Reator Aeróbio

O lodo gerado nas estações é manejado de forma centralizada na UGL, localizada na ETE Samambaia, onde também ocorre o armazenamento deste lodo, após ser processado, até a disposição final selecionada. Devido aos sistemas utilizados em cada ETE, e quantidade de lodo gerada associada, apenas algumas estações não realizam tratamento do lodo na própria ETE antes de transportá-lo para a UGL. Na Tabela 5.5 são indicadas as estações que possuem tratamento prévio do lodo gerado e os tipos de lodo produzidos que serão encaminhados para o manejo, bem como os tipos de tratamento a que são submetidos antes do seu transporte.

Tabela 5.5 - Tipos de lodo gerados em cada ETE e tratamentos associados.

Estação de Tratamento	Recebe tratamento na ETE?	Tipo de Lodo gerado	Tipo de tratamento interno na ETE
ETE Águas Lindas	Não	-	-
ETE Brasília Norte	Sim	- Lodo primário - Lodo secundário - Lodo químico	Adensadores de lodo por gravidade; Adensadores de lodo por flotação; Digestores anaeróbios; Desidratação por centrífuga;
ETE Brasília Sul	Sim	- Lodo primário - Lodo secundário/aeróbio não estabilizado - Lodo químico	Adensadores de lodo por gravidade; Adensadores de lodo por flotação; Digestores anaeróbios; Digestores aeróbios; Desidratação por centrífuga;
ETE Gama	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado/RAFA - Lodo aeróbio estabilizado	Adensamento por flotação; Desidratação por centrífuga;
ETE Melchior	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado/RAFA - Lodo do UNITANK/misto	Armazenamento em tanque-pulmão; Adensamento por flotação por ar dissolvido sob pressão (FAD); Desidratação por centrífuga;
ETE Recanto das Emas	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado - Lodo aeróbio estabilizado	Desidratação por centrífuga;
ETE Riacho Fundo I	Sim	- Lodo aeróbio não estabilizado	Digestores aeróbios; Desidratação por centrífuga;
ETE Sobradinho	Sim	- Lodo primário - Lodo secundário/aeróbio não estabilizado	Digestores anaeróbios; Desidratação por centrífugas; *O lodo pode ser secado por lagoas/leitos da própria ETE.
ETE Alagado	Não	- Lodo anaeróbio estabilizado	
ETE Santa Maria	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado	Desaguamento em leitos de secagem;
ETE São Sebastião	Não	- Lodo anaeróbio estabilizado/RAFA	
ETE Paranoá	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado/RAFA	Desaguamento em leitos de secagem;
ETE Vale do Amanhecer	Sim	- Lodo anaeróbio estabilizado/RAFA	Desaguamento em leitos de secagem;
ETE Samambaia	Não	- Apenas limpeza de lagoas	
ETE Brazlândia	Não	- Apenas limpeza de lagoas	
ETE Planaltina	Não	- Lodo anaeróbio estabilizado - Lodo aeróbio estabilizado	

Fonte: Adaptado de SIESG (2014).

Após a produção e o pré-tratamento, os lodos são encaminhados para a UGL onde, além do armazenamento adequado, ocorrerá a higienização por processo de solarização.

Na Tabela 5.6 são apresentados os dados de volume de lodo recebido no ano de 2022 de cada ETE, pela UGL, bem como a porcentagem que este volume representa do total de lodo recolhido naquele ano (CAESB, 2023). Cabe salientar que a produção de lodo associada às ETEs Samambaia e Brazlândia se refere ao lodo proveniente da limpeza das lagoas facultativas, o valor indicado para a ETE Samambaia representa apenas uma parte do lodo total acumulado, visto que sua limpeza ainda estava em andamento durante o ano de 2022 e 2023. Destacam-se em negrito as ETEs com maior produção, sendo elas a ETE Norte, ETE Sul e ETE Melchior. Ressalta-se que a ETE Águas Lindas, apesar de transportar lodo para manejo pela UGL, está localizada no Goiás.

Tabela 5.6 - Quantidade de lodo de esgoto gerada por ETE em m³/mês (2022).

Estação de Tratamento	Volume Total Produzido em cada ETE em 2022 (m³)	Percentual em Relação ao Total
ETE Águas Lindas	1300	0,8%
ETE Brasília Norte	**22942**	14,3%
ETE Brasília Sul	**44758**	27,8%
ETE Gama	5162	3,2%
ETE Melchior	**38450**	23,9%
ETE Recanto das Emas	9674	6,0%
ETE Riacho Fundo I	1655	1,0%
ETE Sobradinho	5964	3,7%
ETE Alagado	8562	5,3%
ETE Santa Maria	1868	1,2%
ETE São Sebastião	1022	0,6%
ETE Paranoá	252	0,2%
ETE Vale do Amanhecer	12	0,0%
ETE Samambaia	3858*	2,4%
ETE Brazlândia	8410*	5,2%
ETE Planaltina	7064	4,4%
Total Produzido:	160953	100%

**ETEs marcadas em verde estão associadas a lodos com digestão em RAFAs sem desidratação mecânica.*

Fonte: CAESB (2023).

Nos últimos anos, a produção total diária de lodo desaguado nas unidades de tratamento da CAESB é da ordem de 340m³ (CAESB, 2022). Baseando-se na população atendida por cada ETE e nos valores de produção de lodo indicados na literatura e obtidos por dados da CAESB, pode-se fazer uma comparação entre esses montantes. A Tabela 5.7 apresenta essa comparação.

Tabela 5.7 - Comparação entre produção de lodo prevista em literatura e valores de lodo produzidos no ano de 2022.

Estações de Tratamento de Esgoto do DF	Cálculo de Lodo Produzido para a população atendida em 2021, baseado na Literatura			Valores de Lodo Produzido no Ano de 2022 (m^3/ano)
	Massa (tonSS/dia)	Volume (m^3/dia)	Volume (m^3/ano)	
ETE Brasília Sul	27 - 37	683 - 2.536	249.178 - 925.518	44.758
ETE Brasília Norte	9 - 12	229 - 850	83.545 - 310.312	22.942
ETE Riacho Fundo	2 - 3	48 - 177	17.402 - 64.636	1.655
ETE Sobradinho	5 - 7	0 - 1	95 - 251	5.964
ETE Planaltina	1 - 2	23 - 69	8.354 - 25.062	7.064
ETE Vale do Amanhecer	0 - 1	10 - 22	3.620 - 7.963	12
ETE Paranoá	6 - 9	154 - 558	56.190 - 203.687	252
ETE São Sebastião	1 - 1	15 - 45	5.535 - 16.604	1.022
ETE Gama	9 - 12	401 - 1.069	146.358 - 390.287	5.162
ETE Santa Maria	3 - 4	67 - 242	24.394 - 88.429	1.868
ETE Alagado	5 - 7	124 - 451	45.361 - 164.434	8.562
ETE Recanto das Emas	5 - 7	105 - 217	38.192 - 79.322	9.674
ETE Samambaia	13 - 18	307 - 1.113	112.022 - 406.079	3858*
ETE Melchior	30 - 36	2.020 - 3.578	737.157 - 1.305.821	38.450
ETE Brazlândia	1 - 2	4 - 13	1.629 - 4.887	8410*

Pode-se perceber que a produção de lodo atual é relativamente inferior ao valor previsto em literatura. Isso pode ser explicado, em sua maioria, devido aos tratamentos internos do lodo antes de serem enviados para a UGL, onde esse montante é pesado.

Visto que as ETEs Brasília Norte, Brasília Sul e ETE Melchior estão relacionadas com a maior produção de lodo, os fluxogramas das Figuras 5.1 e 5.2 ilustram o pré-tratamento do lodo dentro dessas ETEs antes do transporte para a UGL.

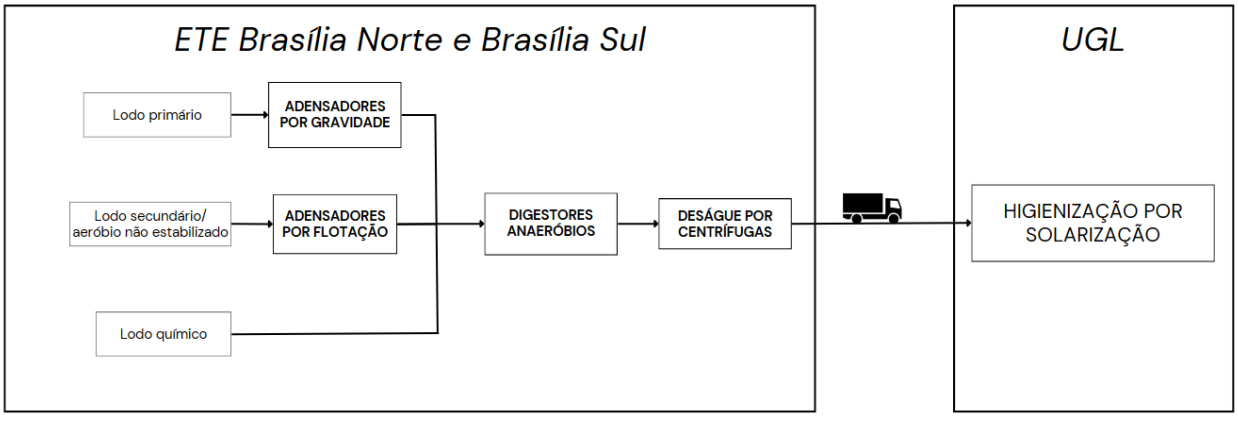


Figura 5.1 - Processos de pré-tratamento interno do lodo produzido nas ETEs Brasília Norte e Brasília Sul.

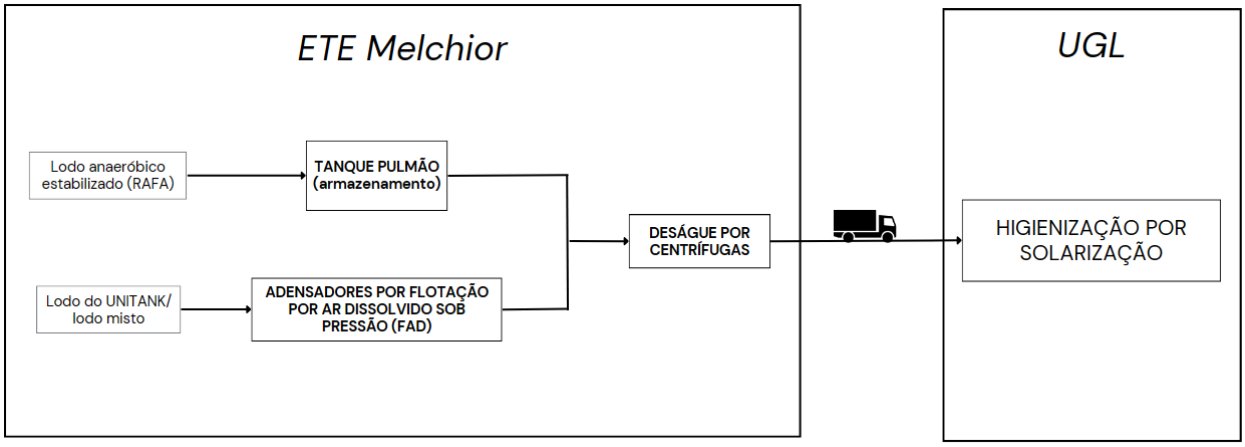


Figura 5.2 - Processos de pré-tratamento interno do lodo produzido na ETE Melchior.

Dados da CAESB (2022) indicam que o lodo localizado nas baias de secagem, ao decorrer de um ano perde em média 25% do seu volume por meio de perda de umidade e crescimento de vegetação, já o lodo armazenado em galpões pode reduzir até 40% seu volume, uma vez que não está exposto à precipitação. Para a destinação adequada do lodo seco higienizado, em concordância com as normas vigentes, são utilizados caminhões basculantes adaptados com sistemas de segurança, minimizando o risco de derramamento do lodo (CAESB, 2022).

5.2. PROCESSO DE ANÁLISE DE QUALIDADE DO LODO

Com a chegada do período de seca, costumeiramente no início de agosto, a primeira análise de qualidade do lodo, mais simplificada, é feita por meio de amostragem composta. Essa amostragem é feita trimestralmente e levando em consideração as dinâmicas de enchimento e esvaziamentos de cada baia (CAESB, 2022). Os Laboratórios da própria CAESB são responsáveis pelas análises microbiológicas (a exemplo de análise de parâmetros Coliformes Termotolerantes e quantidade de Ovos viáveis de Helmintos) e de série de sólidos.

Uma vez que tais parâmetros possuam valores em concordância com as normas vigentes, supracitados na Tabela 3.3.6, o lote analisado segue para análise dos demais parâmetros solicitados, tais como determinação de *Salmonella sp.*, enterovírus, metais, compostos orgânicos e outros parâmetros físico-químicos de importância. O tempo necessário para que todos os parâmetros se adequem à Classe A de lodo, previstos na norma,

pode chegar a 12 meses, uma vez que dependerá não só da composição da mistura dos lodos das ETEs, mas também das características climáticas do período de secagem e padrão de revolvimento e espalhamento desse lodo. Nas Tabelas 5.8 e 5.9/5.10 são listados todos os parâmetros analisados no primeiro e segundo momento de análise.

Tabela 5.8 – Parâmetros analisados pela CAESB na primeira etapa.

Parâmetros Microbiológicos (1ª etapa)
Coliformes termotolerantes
Ovos viáveis de helmintos
Salmonella
Vírus entéricos
Cistos viáveis de protozoários

Fonte: CAESB, 2023

Tabela 5.9 - Parâmetros analisados pela CAESB na segunda etapa.

Parâmetros Inorgânicos e Físico-químicos (2ª etapa)	**Parâmetros Orgânicos (2ª etapa)**
pH (água)	1,2 - Diclorobenzeno
pH (KCl)	1,3 - Diclorobenzeno
Sólidos Totais	1,4 - Diclorobenzeno
Sólidos Voláteis	1,2,3,4 - Tetraclorobenzeno
Teor de Cinzas	1,2,4,5 - Tetraclorobenzeno
Umidade	1,2,3,5 - Tetraclorobenzeno
Carbono Orgânico	1,2,3 - Triclorobenzeno
Sódio	1,2,4 - Triclorobenzeno
Cálcio Total	1,3,5 - Triclorobenzeno
Enxofre Total	Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)
Fósforo Total	Dimetil ftalato
Magnésio Total	Di-n-butil ftalato
Nitrogênio Amoniacal	2,4 - Diclorofenol
Nitrogênio de Nitrato	Pentaclorofenol
Nitrogênio de Nitrito	2,4,6 - Triclorofenol
Nitrogênio Kjeldahl	Cresois
Potássio	Benzoantraceno
Ferro	Benzopireno
Manganês	Benzofluoranteno
Alumínio	Fenantreno
Arsênio	Indeno(1,2,3-c,d)pireno
Antimônio	Lindano
Bário	Naftaleno

Tabela 5.10 - Parâmetros analisados pela CAESB na segunda etapa (continuação).

Parâmetros Inorgânicos e Físico-químicos (2ª etapa)	Parâmetros Orgânicos (2ª etapa)
Cádmio	Aldrin
Chumbo	Clordano
Cromo Total	DDT
Mercúrio	Dieldrin
Níquel	Dioxinas e Furanos
Selênio	Endrin
Boro Total	Heptacloro
Cobre	Hexaclorobenzeno
Molibdênio	Mirex
Zinco	PCB's
	Toxafeno

Fonte: CAESB, 2023.

Na Tabela 5.11/5.12 são apresentados os valores médios de parâmetros obtidos na segunda etapa de análise, do lote de lodo seco de 2021.

Tabela 5.11 - Valores para parâmetros de análise de qualidade do lodo seco (lote de 2021).

Parâmetros	Valores Médios Obtidos	Unidade
pH em água destilada (1:5)	7,7	-
Umidade	39	%
Fósforo Total	1,8	%
Matéria Orgânica Total	35,06	%
Carbono Orgânico Total	17,1	%
Nitrogênio Kjedahl	1,57	%
Nitrogênio Amoniacal	0,31	%
Nitrogênio de Nitrato e Nitrito	297	mg / kg
Enxofre	1,05	%
Sólidos Totais	61	%
Sólidos Totais Fixo	45,21	%
Cinzas	53,37	%
Sólidos Totais Volátil	15,79	%
Cálcio Total	1,45	%

Tabela 5.12 - Valores para parâmetros de análise de qualidade do lodo seco (lote de 2021) (continuação).

Parâmetros	Valores Médios Obtidos	Unidade
Magnésio Total	0,33	%
Potássio Total	0,13	%
Sódio Total	0,07	%
Alumínio Total	6,07	%
Ferro Total	2,69	%
Fração de mineralização	20	%
Sólidos voláteis/Totais	0,26	

Fonte: CAESB, 2023.

Os valores dos compostos apresentados na tabela, apesar de não possuírem um limite de variação de seu valor, são requisitados pela CONAM 003/06. Percebe-se que a relação carbono orgânico, nitrogênio e fósforo é de aproximadamente 9:2:1.

Ademais, para fins de acompanhamento das reações que ocorrem nas pilhas de lodo durante sua secagem, são feitas medições periódicas de temperatura. Ressalta-se que, devido às atividades microbiológicas que ocorrem no lodo durante o processo de solarização, as temperaturas atingidas dentro das leiras podem ultrapassar 60°C. A Figura 5.3 apresenta uma pequena parte do lodo seco armazenado em galpão que passou por processo de queima devido a altas temperaturas resultantes dos processos metabólicos dos microrganismos. Percebe-se aqui que o lodo será tratado por meio da solarização até que seus parâmetros atinjam os valores preconizados pelas normas vigentes para lodo Classe A.



Figura 5.3 - Área de lodo seco em processo de queima devido às temperaturas internas do lodo.

Ao atingir os parâmetros de Classe A, o lodo ficará disponível para disposição em áreas agrícolas. A partir desse momento, as fazendas interessadas devem entrar em contato com a mediadora entre os agricultores e a CAESB, para indicar a área de interesse e apresentar os documentos necessários para análise de possibilidade de aplicação. No DF este papel é feito pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (EMATER). O transporte do lodo para as áreas será de responsabilidade compartilhada entre a CAESB e o proprietário, sendo regida pelo Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR). A Figura 5.4 apresenta um fluxograma dos passos necessários para disposição do lodo em área agrícola. Ademais, em casos de cascalheiras, por exemplo, ou outras áreas degradadas que também demandem de biossólidos para recuperação da vegetação, lodos Classe B ou C podem ser aplicados, a depender das características do local. Ressalta-se que, atualmente, todo o biossólido gerado pela solarização consegue ser destinado para áreas agrícolas solicitantes, de forma que não há acumulo de lodo não aproveitável.

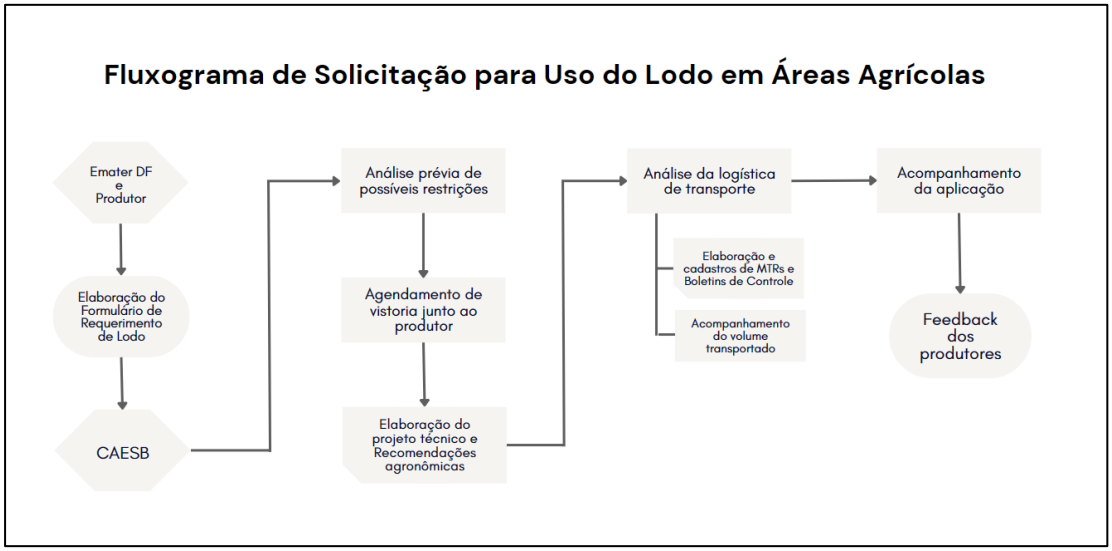


Figura 5.4 - Fluxograma de Solicitação para Uso do Lodo em Áreas Agrícolas

5.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS PRINCIPAIS DE TRATAMENTO

Em vista da amplitude de tempo necessária para higienização do lodo pela solarização, e levando em conta as atividades que precisam ser realizadas para permitir esse processo, como o revolvimento e o espalhamento do lodo por maquinário específico, pode-se direcionar o foco da análise para métodos de higienização que proponham uma melhor eficiência, ressaltando a compostagem e a secagem térmica.

5.3.1. Compostagem:

Durante o processo de compostagem, entre 20 e 30% dos sólidos serão convertidos em dióxido de carbono e água, além disso, à medida que se tem a

decomposição da matéria orgânica, o aumento significativo da temperatura (entre 50 e 70ºC) possibilita a destruição de organismos patogênicos (METCALF e EDDY, 2016).

O uso de agentes estruturantes mostra-se necessário para uma compostagem eficiente, fornecendo suporte estrutural e aumentando a porosidade da mistura para uma melhor aeração. Exemplos comuns de materiais estruturantes são provenientes de madeiras, folhas ou mesmo pneus. Características e exemplos desses materiais podem ser observados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Características dos materiais estruturantes utilizados na compostagem aeróbia de lodos provenientes de sistemas de tratamento de efluentes.

Material Estruturante	**Comentários**
Lascas de madeira	- Pode ser necessário fazer aquisição - Alta taxa de recuperação por peneiramento - Fonte adicional de carbono
Galhos picados	- Pode ser obtido sem custos - Baixa taxa de recuperação por peneiramento - Fonte adicional de carbono - Maior tempo de cura do composto
Folhas e outros resíduos vegetais	- Deve ser fragmentado - Teor de umidade variado - Fonte de carbono prontamente disponível - Porosidade relativamente baixa - Não pode ser recuperado
Pneus triturados	- Frequentemente utilizado com outro material estruturante - Não é uma fonte adicional de carbono - Recuperação de quase 100% - Pode conter metais
Resíduos de madeira triturados	- Possivelmente disponível como resíduo - Não pode ser considerado uma fonte de carbono

Fonte: METCALF e EDDY (2016).

Já a adição de condicionadores reduz a umidade do solo e, assim como os estruturantes, aumenta o volume de vazios. Sua importância também está associada à manutenção da relação entre carbono e nitrogênio recomendada para compostagens – entre 25:1 e 35:1, visto que em situações com menores teores de carbono, pode ocorrer perda de nitrogênio como amônia. (METCALF e EDDY, 2016). Pode-se identificar na tabela 5.12 que alguns materiais estruturantes também atuam como condicionadores.

METCALF e EDDY (2016) também descrevem a estrutura de dois métodos principais de compostagem que podem ser utilizados em grandes escalas:

- Método agitado ou de leiras:

  Neste método a mistura de lodo desaguado e agente estruturante/condicionador será disposta em leiras com 1 a 2m de altura e 2 a 4,5m de base. O material a ser composto é agitado periodicamente com maquinário especial, para introdução de oxigênio, controle de temperatura e homogeneização do material. O período de compostagem varia entre 21 a 28 dias, com revolvimento das leiras pelo menos 5 vezes, enquanto se mantem a temperatura acima de 55ºC. A forma e frequência com que a leira é revolvida influenciarão a atividade microbiológica em seu interior, podendo variar da condição aeróbia desejada para aeróbia facultativa, anaeróbia ou outras combinações. O revolvimento das leiras, bem como condições anaeróbias no interior das leiras, acompanha a liberação de maus odores.

- Método estático ou de pilhas estáticas:

  O material é mantido imóvel e a injeção de ar é feita por sopradores, ou seja, uma rede de tubos perfurados de aeração ou exaustão, sobre a qual o material é colocado. A compostagem dura entre 21 a 28 dias, seguidos por um período de cura de 30 dias ou mais. A altura das pilhas varia entre 2 e 2,5m, sendo comum o uso de composto peneirado sobre a pilha para seu isolamento. Recomenda-se que cada pilha possua um secador individual, para um controle eficaz da aeração.

Deve-se considerar que a composição da mistura composta deve conter, aproximadamente, 40% de sólidos na base seca para garantir eficiência na compostagem. A Tabela 5.14, de METCALF e EDDY (2016), indicam condições importantes a se considerar sobre a compostagem.

Tabela 5.14 - Considerações sobre o projeto do processo de compostagem aeróbia de lodos.

Item	**Comentário**
Tipo de lodo	Tanto lodos como biossólidos podem ser compostos. Os lodos tem maior potencial de emissão de odor, principalmente nos sistemas de leiras. Os lodos, comparados aos biossólidos, têm maior potencial energético, degradarão mais facilmente e apresentarão maior demanda de oxigênio.
Condicionador e agente estruturante	As características do condicionador e do agente estruturante, tais como teor de umidade, tamanho de partícula e carbono disponível, afetam o processo e qualidade do produto. Os agentes estruturantes devem estar prontamente disponíveis.
Relação carbono:nitrogênio	A relação inicial C:N deve estar na faixa de 25:1 a 35:1 em massa. Com as menores relações, haverá perda de amônia. Deve ser verificado se o carbono disponível é facilmente biodegradável.
Sólidos voláteis	O teor de sólidos voláteis de uma mistura para compostagem deve ser maior que 30% dos sólidos totais. O lodo desaguado normalmente requererá a adição de condicionador ou de material estruturante para ajustar o teor de sólidos.
Demanda de ar	O ar, com menos de 50% de oxigênio remanescente, deve atingir todas as partes da mistura em processamento para obter os melhores resultados, especialmente nos sistemas mecanizados.
Teor de umidade	O teor de umidade da mistura em processamento não deve ser superior a 40% nas pilhas estáticas, nas leiras ou na compostagem em tambor.
Controle de pH	O pH da mistura em processamento deve, geralmente, estar na faixa ente 6 e 9. Para atingir as condições ótimas de decomposição aeróbia, o pH deve ser mantido entre 7 e 7,5.
Temperatura	Para melhores resultados, a temperatura deve ser mantida entre 50 e 55°C no início do processo e entre 55 e 60°C para o período remanescente de compostagem ativa. Se a temperatura for mantida acima de 65°C por um longo período de tempo, a atividade biológica será reduzida.
Controle de patógenos	Se o processo de compostagem for conduzido de forma adequada, é possível inativar todos os patógenos, ervas daninhas e sementes. Para atingir esse nível de controle, a temperatura deve ser mantida nos níveis recomentados pela norma vigente para biossólidos Classe A.
Mistura e revolvimento	Para evitar secagem excessiva, formação de torrões e canais de preferência de aeração, o manterial que está sendo composto deve ser misturado ou revolvido periodicamente. A frequência de mistura ou revolvimento dependerá do tipo de operação de compostagem.
Metais pesados e contaminantes orgânicos	Os metais pesados e contaminantes orgânicos no lodo e no composto devem ser monitorados para assegurar que as suas concentrações não excedam os limites estabelecidos nas normas aplicáveis para o uso do produto final.
Restrições locais	Os fatores que devem ser considerados na seleção de um local para a unidade de compostagem incluem disponibilidade de área, facilidade de acesso, proximidade com a estação de tratamento ou outro tipo de atividade na qual o composto pode ser utilizado, condições climáticas e tipo de ocupação no entorno.

Fonte: METCALF e EDDY (2016).

O uso de materiais como podas de áreas públicas ou mesmo pneus descartados na compostagem, desde que feito corretamente, apresenta uma forma sustentável de reciclagem e de diminuição do volume de resíduos destinados a aterros, por exemplo. A inserção dessa matéria seca diminui a necessidade de desaguamento do lodo, podendo também diminuir a quantidade de metais presentes no composto.

5.3.2. Secagem térmica

Para classificação dos métodos de secagem térmica, METCALF e EDDY (2016) leva-se em consideração a forma de transferência do calor, seja convecção (secador direto), condução (secador indireto) ou radiação (infravermelhos, menos comuns para secagem de biossólidos), além da combinação desses métodos. Ademais, em todos os casos, têm-se três estágios de secagem: aquecimento – sólidos e água são aquecidos até temperatura de processo; secagem com taxa constante – a água evaporada da superfície das partículas de lodo é substituída pela umidade interna, de maneira que a superfície do lodo permanece saturada (estágio de maior duração, onde a maior parte da água é removida); e secagem em taxa declinante – taxa de secagem passa a ser controlada pela difusão de água presente no interior das partículas para a superfície. São exemplos de fontes de energia: carvão, óleo combustível, gás, radiação infravermelha ou o próprio lodo seco.

- Sistemas por convecção ou secagem direta:

  O lodo é colocado em contato direto com o meio de transferência de calor (a exemplo de gases quentes). Exemplos comuns para a secagem de biossólidos são o secador rotativo, o secador de leito fluidizado e o secador de correia. Para o secador rotativo, lodo deve ser misturado a um material seco previamente em um misturador, garantindo umidade de aproximadamente 65% para melhor movimentação no secador, seu produto final apresenta concentração de sólidos entre 90 e 95%. O secador de leito fluidizado permite a produção de material peletizado, utilizando a injeção de vapor ou óleo térmico, o gás de fluidificação utilizado garante a suspensão do biossólido, garantindo sua agitação. A temperatura deve ser mantida entre 85 e 120ºC, permitindo a recuperação de calor residual de outras fontes. Nos secadores de correia, o lodo é

distribuído em uma camada fina e transportado em uma correia pelo o secador, gases quentes passam através da correia e da camada de lodo, possibilitando sua secagem.

- Sistemas por condução ou secagem indireta:

  O lodo úmido é separado do meio de transferência de calor (como vapor, óleo térmico ou outro fluido de aquecimento) por uma parede sólida de retenção. É comum o uso de pás, placas perfuradas ou discos montados sobre eixos rotativos para transportar o lodo através de secadores horizontais, a secagem ocorrerá pela quebra dos agregados de lodo durante a agitação do tambor e contato do material com a superfície metálica aquecida. Nestes secadores, a secagem do lodo objetiva um nível de umidade especificado, e seu produto final terá concentração de sólidos entre 65 e 95%, dependendo da sua destinação escolhida.

A Tabela 5.15, de METCALF e EDDY (2016), apresenta vantagens e desvantagens a serem consideradas sobre os secadores térmicos.

Tabela 5.15 - Vantagens e desvantagens dos secadores térmicos.

Vantagens	**Desvantagens**
1. Processo comprovado	1. Custo de investimento relativamente alto
2. O produto é facilmente comercializado e adequado para uma variedade de aplicações consistentes com as leis vigentes para reúso benéfico	2. Consumo elevado de energia 3. O retorno pela comercialização da produção de biossólidos Classe A não compensa os custos operacionais
3. Sistemas compactos	4. Potencial para a formação de poeiras
4. Redução de custo de transporte dos produtos	5. Maior risco de incêndio e explosão
5. Redução significativa de patógenos (produção de lodo Classe A)	6. Sistema relativamente complexo, exige profissionais altamente qualificados
6. Aumento da capacidade de armazenamento	7. Potencial de geração de odor no processamento e pelo produto final
7. Não requer a adição de produtos químicos	
8. Aumenta o poder calorífico dos biossólidos	

Fonte: METCALF e EDDY (2016).

6. CONCLUSÃO

O uso do lodo Classe A como potencial adubo para áreas agrícolas e áreas degradadas já é uma realidade no Distrito Federal e entorno. Todo o material produzido ao decorrer do ano já é destinado quando atinge os parâmetros de qualidade, de forma que não há mais estoque ou acúmulo de lodo antigo. Esses dados indicam que a solarização em si é um método eficiente e eficaz de tratamento e higienização do lodo de esgoto, cujos custos estão associados apenas ao transporte do lodo e uso de maquinários para revolvimento no período de seca. As desvantagens principais que se pode observar nesse método seriam o espaço gasto para armazenamento do lodo úmido e demora de cerca de 1 ano no período de higienização do lodo.

O tratamento do lodo por meio de compostagem se apresenta como uma solução vantajosa contra a demora na higienização, em vista da capacidade de tratar e dispor não só o lodo de esgoto, mas também resíduos sólidos como podas de árvores ou pneus. A adição desses estruturantes/condicionadores permite o uso de um lodo com mais teor de umidade, e também diminui em proporção a quantidade de materiais de importância sanitária, como teor de metais e outros poluentes. O tempo necessário para adequação do lodo à Classe A será consideravelmente menor comparado à solarização. Deve-se considerar que o espaço necessário para implementação de um sistema de compostagem, levando em considerações as tecnologias atuais desse tratamento, será consideravelmente maior que para um processo de solarização, visto a disposição geométrica das leiras ou pilhas e do incremento de material orgânico que deverá ser adicionado ao lodo. Os gastos associados à implementação desse sistema deverão considerar o uso de maquinário para revolvimento das leiras e o gasto com o sistema de aeração, bem como o manejo de espaço para realização do processo, ressaltando a economia conjunta do sistema público pela disposição sustentável de condicionantes.

O sistema de secagem térmica, por sua vez, pode ser considerado inoportuno em primeira análise, visto os gastos energéticos para aquecimento do lodo, que também deverá ser condicionado com material já seco para apresentar teor de umidade condizente com um tratamento eficaz. A vantagem desse processo será a rapidez de adequação do lodo à Classe A, aliado à grande diminuição no volume de lodo gerado e no espaço que este irá ocupar até sua destinação. É importante considerar neste contexto a variação na composição do produto final obtido e possíveis poluentes associados ao uso da secagem térmica. Considerando perspectivas de crescimento populacional positivo, associado à uma maior produção de resíduos sólidos, o espaço para tratamento desse resíduo será cada vez mais caro e mais

escasso, de forma que em alguns locais possa ser uma opção viável. Ademais, o desenvolvimento de novas tecnologias de secagem, que permitam um menor gasto energético e o uso de materiais cada vez com maior teor de umidade, pode apresentar uma solução satisfatória para tratamento do biossólido.

Deve-se fazer um estudo mais aprofundado que considere os gastos associados ao maquinário usado durante a solarização para o revolvimento e espalhamento do lodo durante os 12 meses do processo de higienização em comparação aos processos sugeridos, levando em consideração o uso de espaço disponível para tratamento e a proporção de resíduos sólidos variados (como madeiras, pneus e podas) produzidos na localidade.

Ademais, ressalta-se que as legislações a respeito de micropoluentes atualmente são insuficientes, desconsiderando fatores como concentrações de medicamentos ou de microplásticos no biossólido obtido como produto final. Estudos sobre o impacto de microplásticos no meio ambiente, advindo da interação do solo com lodo tratado já existem e alertam para a necessidade de fiscalização e remoção desse material antes da aplicação no solo. Dessa forma, espera-se que, com avanço de estudos e análises do assunto, se apresente maior rigor na legislação sobre tais poluentes e isto influenciará diretamente na relevância e necessidade de determinados tipos de tratamentos como a secagem térmica, para remoção total do material nocivo ao meio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFARMA – Associação Brasileira de Redes de Farmácias e Drogarias (2016). **Grandes Números Abrafarma ano base 2015**. Disponível: <https://www.abrafarma.com.br/sobre-1-c1mp6 >. Acesso em: outubro de 2017.

ACERO, J.L.; RODRIGUEZ, E.; MERILUOTO, J. (2005). **"Kinetics of reactions between chlorine and the cyanobacterial toxins microcystins."** Water Research, 39(8), 1628-1638. METCALF e EDDY; Trad.: Hespanhol, I. Mierzwa, J. C.; Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. (2011). **Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal - PGIRH.**

AMARAL, W.B.F.; LINS, N.A.; SOUZA, J.C.G. (2001). **"Remoção de cianobactérias e neurotoxinas em unidades de tratamento compactas pressurizadas.".** 21° Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, João Pessoa, PB, Brasil.

BOTTONI, P.; CAROLI, S.; BARRA-CARACCIOLO, A. (2010). **"Pharmaceuticals as priority water contaminants." Toxicological and Environmental Chemistry,** 92(3), 549-565.

BRASIL. Portaria n.º 3916/MS/GM, de 30 de Outubro de 1998. **Política nacional de medicamentos.** Diário oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 10 julho 1998.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. [s.l.] LMC - Pharmabooks, 2017.

ANA. **Atlas Esgoto - Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017.

BATISTA, L. F. **Lodos Gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto no Distrito Federal: Um Estudo de sua Aptidão para o Condicionamento, Utilização e Disposição Final**. Brasília, 2015.

BRASIL. **Decreto Nº 8.141, de 20 de Novembro de 2013, Dispõe sobre o Plano Nacional de Saneamento Básico - PNSB, institui o Grupo de Trabalho Interinstitucional de Acompanhamento da Implementação do PNSB e dá outras providências.** Diário Oficial da União, , nov. 2013.

BRASIL. **Lei N° 14.016, de 15 de Julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico.** Diário Oficial da União, , jul. 2020.

CAESB. **Sinopse do Sistema de Esgotamento Sanitário do Distrito Federal**. 27. ed. Brasília: CAESB, 2014.

CAESB. **Descritivo dos Sistemas de Tratamentos de Esgotos das ETEs da POE/DP/CAESB – 2020 - Produção de Lodo e Estimativa de Biogás Teórico.** Brasília: CAESB, 2020.

CAESB. **Plano De Exploração De Serviços Da Caesb: Diagnóstico e Caracterização.** Brasília: CAESB, 2021. V.01.T02

CAESB. Relatório Técnico POEGL Nº 04/2021. **Relatório de conclusão da obra da elevatória da UGL, em atendimento a condicionante n° 7 da LO n° 18/2020**. Brasília: CAESB, 2021.

CAESB. Relatório Técnico POEGL Nº 06/2022. **Relatório Anual Do Monitoramento E Desempenho Ambiental Da UGL – LO N° 175/2020**. Brasília: CAESB, 2022.

CÁRDENAS-TALERO, J. L. et al. The Influence of Municipal Wastewater Treatment Technologies on the Biological Stabilization of Sewage Sludge: A Systematic Review. **Sustainability**, v. 14, n. 10, p. 5910, 13 maio 2022.

CHAVOSHANI, A. et al. **Micropollutants and Challenges**. [s.l.] Elsevier, 2020.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Biosolids: What are the different types of reuse? **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117844, nov. 2019.

CONAM. **Resolução N° 03, de 18 de julho de 2006 - Disciplina o Uso do Lodo de Esgoto no Distrito Federal e dá outras providências**. Diário Oficial da União, 2006.

CONAMA. **Resolução N° 498, de 19 de agosto de 2020 - Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências** . Diário Oficial da União, , 2020.

DUBEY, M. et al. Occurrence, fate, and persistence of emerging micropollutants in sewage sludge treatment. **Environmental Pollution**, v. 273, p. 116515, mar. 2021.

IBGE. **Panorama do DF**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/panorama>.

METCALF e EDDY; Trad.: Hespanhol, I. Mierzwa, J. C.; **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Secretaria Nacional de Saneamento, 2019.

SANEPAR; PROSAB. **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Curitiba, 1999.

SNIS. **Painel de Informações de Saneamento no Brasil**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-esgotamento-sanitario>.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering - Treatment and Reuse**. 4ª edição ed. [s.l.] Metcalf e Eddy Inc, 2003.

TYTŁA, M. Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk in Sewage Sludge from Municipal Wastewater Treatment Plant Located in the Most Industrialized Region in Poland—Case Study. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 13, p. 2430, 9 jul. 2019.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F. **Sludge Treatment and Disposal**. [s.l.] IWA, [s.d.]. v. 6, 2007.