



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**RENAN AQUILLIS CORREIA BORGES**

**ANÁLISE DE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE  
ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO  
TRATAMENTO DE ESGOTO PARA DOIS MUNICÍPIOS  
TOCANTINENSES**

Palmas/TO

2022

**RENAN AQUILLIS CORREIA BORGES**

**ANÁLISE DE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE  
ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO  
TRATAMENTO DE ESGOTO PARA DOIS MUNICÍPIOS  
TOCANTINENSES**

Monografia avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de bacharel e aprovada em sua forma final pelo Orientador pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Rose Mary Gondim Mendonça.

Palmas/TO

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

B732a Borges, Renan Aquillis Correia.

Análise de multicritério para seleção de alternativas de disposição de lodo de estação tratamento de esgoto para dois municípios tocanzinos. / Renan Aquillis Correia Borges. – Palmas, TO, 2022.

68 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2022.

Orientadora : Rose Mary Gondim Mendonça

1. Alternativa de disposição de lodo. 2. Disposição final de lodo. 3. Seleção de tecnologia. 4. Análise multivariada. I. Título

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

RENAN AQUILLIS CORREIA BORGES

## **ANÁLISE DE MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO TRATAMENTO DE ESGOTO PARA DOIS MUNICÍPIOS TOCANTINENSES**

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Rose Mary Mendonça Gondim, UFT

---

Prof. Dr. Sergio Carlos Bernardo Queiroz, UFT

---

Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço, UFT

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, pelas conquistas e graças alcançadas, por ter me dado sabedoria e discernimento nos momentos de angústia e insegurança, por ter me amparado durante as dificuldades.

Agradeço imensamente à minha família que sempre estiveram ao meu lado, me dando as melhores condições e apoio para o alcance dos objetivos almejados e acima de tudo pelos valores que me ensinaram. Aos meus pais, Vilma e Flávio por todas as orações e incentivos para nunca desistir e por fazer da minha educação uma prioridade. A Andressa pelo companheirismo e apoio, obrigado por sempre está disponível e sempre ajudar. É por vocês que cheguei até aqui, dando muito orgulho a vocês que tanto amo.

A minha orientadora Rose Mary, por estar comigo há muitos anos, desde os meus primeiros passos no curso, pelo acompanhamento, broncas, conselhos, pelos conhecimentos compartilhados, pela amizade, paciência e dedicação a este trabalho. Aos meus colegas de curso, no qual levarei amizade para a vida.

Obrigada a todos vocês que contribuíram de alguma forma para a minha vida, meu sucesso profissional e pessoal.

## RESUMO

O objetivo do trabalho é avaliar as possíveis alternativas de disposição de lodo ou destino final do lodo de ETEs de modo quantitativo considerando aspectos ambientais, sociais e tecnológicos, e a partir dos dados realizar um estudo considerando a geração de lodo para dois municípios tocantinenses. A metodologia adotada envolveu quatro etapas. Na primeira realizou-se levantamento bibliográfico nos portais de pesquisa Google acadêmico, *Scielo* e ABES com foco nas pesquisas científicas aplicadas ao tema, utilizando palavras-chave no processo. Na segunda estabeleceu-se 22 critérios de decisão agrupados em três dimensões: ambiental, social e tecnológico, para análise multivariada, que foram utilizados na terceira etapa por meio da matriz de avaliação e decisão adaptado de Vanzetto (2012). A última etapa consistiu na utilização de dados de projeção de população atendida de 2019 a 2039 em dois municípios denominados X e Y e massa/volume de lodo desaguado para o cálculo de área ou volume para as quatro melhores alternativas definidas na etapa anterior. Destaca-se que na análise multivariada as tecnologias de uso agrícola, landfarming, recuperação de área degradada e aterro sanitário foram as que obtiveram maior pontuação. Considerando o contexto populacional a ETE Y se destacou por produzir mais lodo anualmente quando comparada a ETE do município X. Observando as 4 melhores alternativas da análise multivariada, a geração de lodo e demanda por área as tecnologias de aterro sanitário e landfarming se sobressaíram em relação a recuperação de área degradada e uso agrícola para os municípios X e Y.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alternativa de disposição de lodo; Disposição final de lodo; Seleção de tecnologia; Análise multivariada.

# **MULTI-CRITERIA ANALYSIS FOR SELECTION OF ALTERNATIVES FOR DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE TREATMENT STATION FOR TWO MUNICIPALITIES IN TOCANTINENS**

## **ABSTRACT**

The objective of the work is to evaluate the possible alternatives of sludge disposal or final destination of the sludge of ETEs in a quantitative way considering environmental, social and technological aspects, and from the data to carry out a study considering the generation of sludge for two municipalities in Tocantins. The adopted methodology involved four steps. In the first, a bibliographic survey was carried out on the Google Academic, Scielo and ABES research portals, focusing on scientific research applied to the topic, using keywords in the process. In the second, 22 decision criteria were established, grouped into three dimensions: environmental, social and technological, for multivariate analysis, which were used in the third stage through the evaluation and decision matrix adapted from Vanzetto (2012). The last step consisted of the use of population projection data served from 2019 to 2039 in two municipalities called X and Y and mass/volume of dewatered sludge to calculate the area or volume for the four best alternatives defined in the previous step. It is noteworthy that in the multivariate analysis, the technologies of agricultural use, landfarming, recovery of degraded areas and sanitary landfill were the ones that obtained the highest scores. Considering the population context, ETE Y stood out for producing more sludge annually when compared to the ETE of municipality X. Observing the 4 best alternatives of the multivariate analysis, sludge generation and demand per area, landfill and landfarming technologies stood out in relation to the recovery of degraded area and agricultural use for municipalities X and Y.

**KEYWORDS:** Sludge disposal alternative; Final sludge disposal; Technology selection; Multivariate analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma das etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados (VON SPERLING E GONÇALVES, 2001).....	15
Figura 2. Fluxograma das etapas de metodologia de pesquisa utilizada no presente estudo.....	27
Figura 3. Taxa de aplicação de lodo da ETE X para dispor no período de 20 anos.....	38
Figura 4. Taxa de aplicação de lodo da ETE Y para dispor no período de 20 anos.....	39
Figura 5. Projeção da área de aplicação para disposição de lodo da ETE X.....	39
Figura 6. Projeção da área para disposição de lodo da ETE Y.....	40
Figura 7. Projeção de número de células do aterro para ETE no período de 20 anos.....	43
Figura 8. Projeção de número de células do aterro para ETE Y no período de anos.....	44
Figura 9. Prognóstico da área da ETE X ao longo de 20 anos.....	46
Figura 10. Prognostico da área a dispor o lodo da ETE Y para 20 anos.....	46
Figura 11. Os dados de lodo nas diferentes alternativas de disposição para porte pequeno (PP) nas dimensões ambiental, social e técnica.....	49
Figura 12. Somatório total dos pesos atribuídos nas alternativas de disposição de lodo de pequeno porte.....	50
Figura 13. Pontuação das diferentes alternativas de disposição para porte grande (PG) nas dimensões ambiental, social e técnica.....	51
Figura 14. Somatório total dos pesos nas dimensões técnica, ambiental e social das alternativas de disposição de lodo de porte grande.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos principais processos biológicos de tratamento de esgoto, BRASIL (2017) .....	16
Tabela 2. Classes de lodo de esgoto ou produto derivado e agentes patogênicos.....	21
Tabela 3. Apresentação dos critérios de avaliação da dimensão ambiental.....	28
Tabela 4. Classes de lodo de esgoto ou produto derivado e agentes patogênicos.....	30
Tabela 5. Compilação dos pesos (escala de 0 a 1) atribuídos aos critérios de avaliação.....	36
Tabela 6. Exemplo de cálculo da produção total de lodo e produção de lodo desaguado para o ano de 2021.....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	13
<b>1.1 Objetivo geral</b> .....	13
<b>1.2 Objetivos específico</b> .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
<b>2.1 Esgotamento Sanitário</b> .....	14
<b>2.2 Sistema de Tratamento: Tecnologias e Desaguamento</b> .....	14
<b>2.3 Alternativas de disposição do lodo</b> .....	18
2.3.1 Incineração.....	18
2.3.2 Aterro sanitário.....	18
2.3.3 Uso agrícola.....	20
2.3.4 Combustível.....	23
2.3.5 Oxidação Úmida.....	23
2.3.6 Recuperação de área degradada.....	24
2.3.7 Uso industrial.....	24
2.3.8 <i>Landfarming</i> .....	25
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	27
<b>3.1 Pesquisa bibliográfica</b> .....	27
<b>3.2 Definição dos critérios de decisão</b> .....	28
3.2.1 Dimensão ambiental .....	28
3.2.2 Contaminação do lençol freático .....	29
3.2.3 Geração de rejeito (Rejeito final pós tratamento).....	29
3.2.4 Impactos negativos na implantação .....	29
3.2.5 Impactos negativos na operação .....	30
3.2.6 Potencial poluidor do lodo.....	30
3.2.7 Produção de Ruído e Vibração (Operação) .....	30
3.2.8 Produção do Odor (Operação).....	31
3.2.9 Supressão vegetal .....	31
3.2.10 Dimensão social.....	31
3.2.11 Não aceitabilidade do processo de disposição do lodo.....	31
3.2.12 Alteração na paisagem.....	32

3.2.13	Não eliminação de organismos patogênicos.....	32
3.2.14	Emanação de gases e outros subprodutos.....	32
3.2.15	Não proteção a segurança e a saúde no trabalho (Operação) .....	32
3.2.16	Reclamação da vizinhança.....	33
3.2.17	Dimensão Técnica .....	33
3.2.18	Complexidade de construção e instalação .....	33
3.2.19	Complexidade de operação.....	33
3.2.20	Não confiabilidade do processo.....	34
3.2.21	Custo de operação e manutenção.....	34
3.2.22	Demanda por área.....	34
3.2.23	Demanda por energia elétrica .....	34
3.2.24	Dificuldade de transporte do lodo .....	35
3.2.25	Susceptibilidade ao clima .....	35
<b>3.3</b>	<b>Desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Aplicação da metodologia de Matriz de Avaliação com as tecnologias indicadas para dois contextos populacionais .....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Melhores alternativas de disposição de lodo .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Dados para cálculos e aspectos operacionais.....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Uso agrícola.....	41
4.2.2	Área degradada.....	45
4.2.3	Aterro sanitário.....	47
4.2.4	<i>Landfarming</i> .....	50
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>60</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil nem todo esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento. A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos representa 42,6% da população urbana total. Desse modo 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo de esgotos. Os esgotos não coletados têm destinos diversos, como encaminhamento para fossas sépticas ou negras, lançamento em rede de águas pluviais ou em sarjetas, disposição direta no solo ou nos corpos d'água (BRASIL, 2017).

Devido à degradação intensa dos recursos hídricos, os esgotos de diversas cidades brasileiras vêm sendo tratados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), que operam com sistemas tecnológicos diferentes (ANDRADE, 1999). No Tocantins, 336.433 habitantes têm seu esgoto tratado (BRASIL, 2017), segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (2019) dos 139 municípios do Estado, apenas 13 municípios possuem estação de tratamento de esgoto.

Nestes locais onde o tratamento está presente, resta um resíduo semissólido, pastoso e de natureza orgânica denominado lodo (ANDRADE, 1999). A destinação do lodo de esgoto proveniente das estações de tratamento é um dos problemas ambientais mais relevantes para as empresas de saneamento (PEDROZA, 2013). Os múltiplos aspectos envolvidos, tais como o volume significativo de material gerado, as limitações na localização de áreas para destinação final de resíduos sólidos, o custo elevado para operacionalizar a disposição adequada e aspectos de ordem ambiental e sanitária, tornam bastante complexa a gestão de resíduos do sistema de esgotamento sanitário (BATISTA; SOUZA, 2020).

Dentre as propostas de destinação e tratamento desse resíduo estão à recuperação ambiental de áreas degradadas, secagem natural com calefação, utilização de secadora térmica, aproveitamento energético e disposição em solos agrícolas (ADASA, 2017). O resíduo sólido, gerado durante o processo de tratamento do lodo, também pode ser reaproveitado na construção civil. Porém, esse processo exige uma sofisticada instalação de sistemas de lavagem dos gases resultantes (MOURA et al., 2020). A definição do sistema de disposição final deverá levar em consideração os aspectos técnicos, econômicos, operacionais e ambientais e as características do lodo, procurando garantir a forma mais adequada de disposição (VANZETTO, 2012). Atualmente, o aterro sanitário é a alternativa mais empregada para o gerenciamento do lodo de ETE no Brasil (AMARAL et al., 2020).

A resolução CONAMA 375/06 define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos e seus produtos derivados, buscando incentivar o aproveitamento energético e a

utilização dos lodos na agricultura, pois é um método ecologicamente correto, que diminui os custos em adubação do solo. Porém, a aplicação somente poderá ocorrer mediante a existência de uma Unidade Geradora de Lodo (UGL) licenciada por órgão ambiental competente (BRASIL, 2012). O processo de incineração, por sua vez, é eficiente na redução do volume do lodo e valorização energética do mesmo. Em contraponto, apresenta a emissão de gases poluentes durante o processo semelhantes ao da pirólise, necessitando de controle ambiental das unidades, além do risco de contaminação de rios e aquíferos por vazamento de efluentes; poluição sonora decorrente do funcionamento do incinerador e problemas operacionais (a variabilidade da composição dos resíduos).

Nesse sentido, existe uma demanda crescente pela disposição segura e com pequeno impacto ambiental desse lodo gerado, garantindo maior segurança e bem-estar para as populações envolvidas (VAN HAANDEL, 2006). Logo, este trabalho analisa possíveis alternativas de disposição desse resíduo considerando a evolução da produção de lodo de duas estações de tratamento de esgoto no Tocantins.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo geral**

Análise multivariadas para seleção de alternativas de disposição de lodo de ETEs para dois municípios tocaninense.

### **1.2 Objetivos específico**

- Estudar as principais alternativas de disposição de lodos de ETEs, e seus condicionantes.
- Adaptar metodologia de análise de multicritérios para a seleção de alternativas de disposição de lodo.
- Avaliar quantitativamente essas alternativas considerando aspectos ambientais, sociais e tecnológicos.
- Analisar as quatro melhores alternativas considerando o contexto de geração de lodo para dois municípios tocaninenses com diferentes taxas de geração.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Esgotamento Sanitário**

O esgotamento sanitário é um dos serviços de saneamento que mais necessitam de análises e propostas para o encaminhamento de soluções de modo a conservar os recursos hídricos (BRASIL, 2017), pois, o déficit de coleta e tratamento de esgotos nas cidades brasileiras tem resultado em uma parcela significativa de carga poluidora que chega aos corpos d'água e causa implicações negativas aos usos múltiplos dos recursos hídricos (BRASIL, 2017). Os esgotos não coletados têm destinos diversos, como encaminhamento para fossas sépticas ou negras, lançamento em rede de águas pluviais ou em sarjetas, disposição direta no solo ou nos corpos d'água.

O vasto crescimento da população mundial e sua urbanização produz o aumento do volume de esgoto gerado e tratado (HONG et al., 2009). A situação do atendimento da população brasileira com serviços de esgotamento sanitário pode ser caracterizada da seguinte forma: 43% é atendida por sistema coletivo (rede coletora e estação de tratamento de esgotos); 12% é atendida por solução individual (fossa séptica); 18% da população se enquadra na situação em que os esgotos são coletados, mas não são tratados; e 27% é desprovida de atendimento, ou seja, não há coleta nem tratamento de esgotos. Aproximadamente 336.433 pessoas são atendidas com coleta de esgoto no estado do Tocantins (BRASIL, 2017).

A Região Norte é a mais carente em termos de serviços coletivos de esgotamento sanitário, possuindo cerca de 450 municípios, em que 86% deles não possuem serviço institucionalizado para tratamento coletivo de esgotos (BRASIL, 2017). Nesse caso a solução individual como a fossa séptica diminui o impacto do lançamento desses efluentes nos corpos hídricos.

O esgoto sanitário é constituído de 99,9% de água e 0,1% de sólidos totais (orgânicos e inorgânicos; suspensos e dissolvidos), além de microrganismos. Devido a este 0,1% de sólidos presentes é necessário tratá-lo (FEITOSA, 2009). A seleção dos processos de tratamento está relacionada, dentre outros aspectos, às características do corpo receptor e da legislação vigente (BRASIL, 2017).

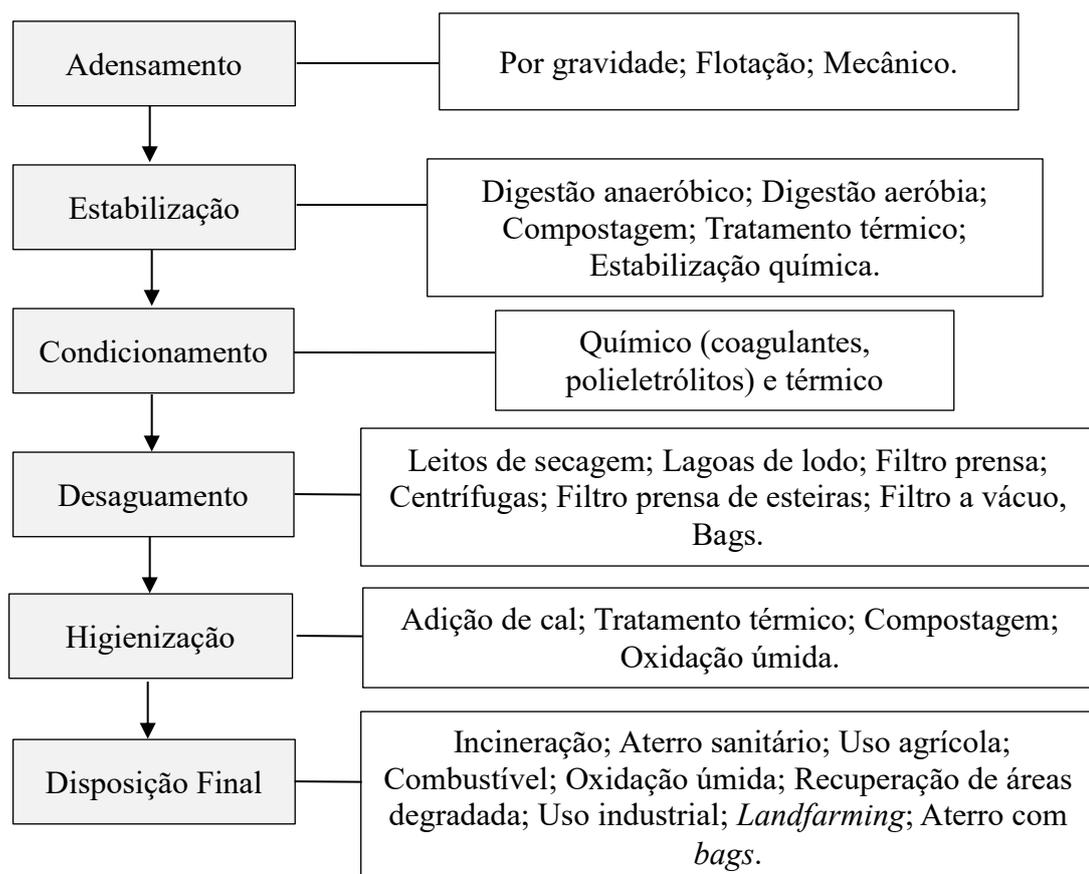
### **2.2 Sistema de Tratamento: Tecnologias e Desaguamento**

O tratamento de esgotos sanitários provenientes de centros urbanos objetiva a redução da matéria orgânica, dos microrganismos patogênicos, dos sólidos em suspensão e, em

circunstâncias especiais, dos nutrientes presentes nos esgotos sanitários, supondo-se ausência de resíduos tóxicos provenientes, por exemplo, de indústrias (BRASIL, 2017).

Esse tratamento dos esgotos pode ser dividido em duas fases: fase líquida e fase sólida. A fase líquida pode ser composta por esgotos domésticos, esgoto industrial e esgoto pluvial. A fase sólida é composta por subprodutos gerados durante o tratamento da fase líquida (FEITOSA, 2009) e nela surge o lodo. As características do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto são muito variáveis, podendo apresentar alta concentração de patógenos, contaminantes químicos e materiais orgânicos (PEREIRA, 2015). As principais etapas do gerenciamento do lodo e os respectivos processos utilizados estão descritos na Figura 1, porém as etapas que compõem o processo de tratamento não precisam necessariamente ser realizadas em todas as estações.

**Figura 1.** Fluxograma das etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados.



Fonte: Von Sperling e Gonçalves, 2001.

Os principais processos de adensamento, segundo descreve Batista (2015), incluem: (I) adensadores por gravidade, que são frequentemente utilizados para adensamento de lodos

primários (faixa de 4 a 10% umidade), mistos (lodo primário e lodos ativado de 2 a 6% umidade; lodo primário e lodo de reator anaeróbio com biofilme de 4 a 8% umidade); (II) adensadores por flotação, são usualmente empregados para o adensamento do lodo ativado em excesso, aumentando a concentração de sólidos para a faixa de 3 a 6% (BATISTA, 2015); e (III) adensamento por processos mecânicos, utiliza equipamentos como centrífugas, adensadores de esteira e tambores rotativos. A opção por um desses tipos deve considerar a complexidade operacional, bem como os custos de operação e manutenção de tais equipamentos.

A estabilização visa remover patógenos, facilitar a desidratação e reduzir os maus odores no processo de tratamento do lodo, através da remoção da matéria orgânica biodegradável (SANTOS, 2004). A estabilização pode ser realizada antes ou após o desaguamento do lodo de esgoto. Os principais processos de estabilização são divididos em estabilização biológica, podendo ocorrer por digestão anaeróbia ou aeróbia, e compostagem, na qual uma mistura inicial de resíduos é submetida à ação de vários grupos de microorganismos, e estabilização química, realizada por meio da adição de produtos químicos (VANZETTO, 2012). Existe também a estabilização térmica, realizada com a adição de calor. De acordo com Von Sperling (2005), a digestão anaeróbia é o principal processo de estabilização de lodos no Brasil.

Os principais processos biológicos de estabilização são (I) lagoas de estabilização; (II) sistemas de lodos ativados e variantes e (III) sistemas anaeróbios e aeróbios (BRASIL, 2017). Os tratamentos estão descritos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Descrição dos principais processos biológicos de tratamento de esgoto (Continua).

Processos	Descrição
Lagoas de Estabilização	Lagoas facultativas, lagoas aeradas facultativas, lagoas anaeróbias, lagoas de alta taxa, lagoas de maturação. Podem remover matéria orgânica e microrganismos patogênicos com eficiência satisfatória, mas seus efluentes também podem apresentar elevada concentração de algas indesejáveis. Cuidados adicionais devem ser tomados para que não se transformem em criadouros de mosquitos.
Sistemas de lodos ativados e variantes	Lodos ativados convencionais, reatores em bateladas sequenciais, lagoas aeradas com mistura completa e valos de oxidação. Mais utilizados em grandes cidades em virtude de serem mais compactos e produzirem efluente de boa qualidade. São processos mais complexos de projetar, construir e operar e a oxigenação necessária para degradação da matéria orgânica ocorre por aeração artificial, consumindo bastante energia. Podem ser concebidos para remoção biológica de nutrientes, tanto fósforo como nitrogênio.

Fonte: BRASIL (2017).

**Tabela 1.** Descrição dos principais processos biológicos de tratamento de esgoto (Conclusão).

Processos	Descrição
Sistemas anaeróbios	Tanques sépticos, tanques Imhoff, filtros anaeróbios, reatores UASB e reatores anaeróbios de leito expandido ou fluidificado. Em geral, necessitam de uma etapa adicional de tratamento visando reduzir a carga de sólidos e melhorar a oxigenação de seus efluentes. Têm sido bastante utilizados como unidades de pré-tratamento de lagoas, filtros biológicos e lodos ativados pois reduzem boa parte da carga orgânica sem necessidade de aeração, resultando em economia de custo com energia elétrica.
Sistemas aeróbios com leito fixo	Filtros biológicos, biodiscos e biofiltros aerados. Mais simples conceitualmente do que os lodos ativados, geralmente são utilizados como pós-tratamento de sistemas anaeróbios. Apresentam elevada remoção de DBO e possibilidade de remoção de nitrogênio. Possuem elevados custos de implantação.

Fonte: BRASIL (2017).

Já o condicionamento é um processo preparatório, no qual produtos químicos (coagulantes) são adicionados ao lodo, visando aumentar a captura de sólidos nos processos de desidratação. O condicionamento do lodo pode ser realizado através da utilização de polímeros orgânicos, produtos químicos inorgânicos ou de tratamento térmico (ANDREOLI et al., 2006). Dentre os coagulantes os inorgânicos destacam-se: sulfato de alumínio, cloreto ferroso, cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico, cal virgem, cal hidratada. Os mais utilizados são a cal e o cloreto férrico.

De acordo com Amuda et al. (2008), por desaguamento entende-se um processo físico empregado no tratamento de lodos de esgoto para eliminar ou reduzir uma quantidade significativa do teor de umidade para posterior processamento e utilização. Esse processo é capaz de transformar lodo líquido em sólido, com teores variando entre 10 e 40% do total de sólidos.

Os métodos de desaguamento mais comumente utilizados incluem processos naturais, tais como leitos de secagem e lagoas de lodo; e processos mecânicos, como centrífugas, filtros à vácuo, filtros prensa de placas, filtros prensa de esteiras e prensas parafuso. Recentemente, segundo Vanzetto (2012), tem-se utilizado membranas geotêxteis (*bags* de geotêxtil) em diferentes conformações. A seleção dos métodos de desaguamento é determinada pelo tipo de lodo a ser processado, suas características e espaço disponível para instalação (AMUDA et al., 2008).

De acordo com Barroso (2007), os filtros sintéticos, conhecidos como *Bag* também denominados geotêxteis, são mantas permeáveis, flexíveis e finas produzidas a partir de fibras

sintéticas. São produtos manufaturados a partir de diferentes polímeros e de variadas formas de fabricação. Os *bags* de geotêxtil são usados principalmente para o desaguamento de sedimentos contaminados, tendo inúmeras aplicabilidades, dentre elas, a contenção e desaguamento de lodo proveniente de processo de tratamento de esgotos (BOINA, 2012). Segundo Barroso (2007) o funcionamento se dá através dos poros, consolidando o material sólido, reduzindo seu volume e consequentemente os custos de transporte e disposição final. Os Bags de manta geotêxtil proporcionam armazenamento que permite a desidratação contínua com o aumento em sólidos não sendo adversamente afetada pelo clima (BOINA, 2012).

### **2.3 Alternativas de disposição do lodo**

Segundo Andreoli et al. (2006), a maior parte do material tratado pelas ETEs, tem sua disposição final por meio de três formas: incineração; disposição em aterros sanitários (VIEIRA et al., 2011), e o uso agrícola. A seguir estão descritas as alternativas citadas e outras de tratamento e disposição final de lodo.

#### **2.3.1 Incineração**

A incineração é um processo que implica na destruição das substâncias orgânicas presentes no lodo através de combustão controlada de resíduos, aplicável a lodos de esgotos previamente adensados, desaguados a um teor de sólidos mínimo de 25% e macerados (BATISTA, 2015). O volume de cinza residual é normalmente inferior a 4% do volume de lodo desaguado alimentado ao incinerador (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

Em sistemas com incineradores, são importantes ao processo o controle odorífero e o conhecimento da composição e poder calorífico do lodo. O processo exige também sistemas de alimentação com temperatura adequada de combustão, tempo de residência para queima e instalações auxiliares específicas para controle ou recuperação de gases, líquidos e particulados segundo os padrões estabelecidos pela legislação ambiental (ANDREOLI, 2006).

Uma preocupação é o uso da cinza em outros sistemas produtivos ou a sua disposição em aterros.

#### **2.3.2 Aterro sanitário**

Outra alternativa, segundo Santos (2003), é técnica de disposição em aterros desse modo busca-se evitar danos à saúde pública e minimizar os impactos ambientais. Von Sperlling (2014) ressalta que na disposição do lodo em aterro não há qualquer preocupação

em se recuperar nutrientes ou se utilizar do lodo para qualquer finalidade útil. A disposição do lodo em aterros requer uma adequação entre as características do lodo e as do aterro.

Segundo Costa e Ribeiro (2013), a Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos definiu o gerenciamento de resíduos sólidos, onde o lodo é incluso na coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Ademais, as obrigações relativas à gestão conforme a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei 12.305/ 2010): Art. 10. Incumbe ao Distrito Federal e aos Municípios a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados nos respectivos territórios, sem prejuízo das competências de controle e fiscalização dos órgãos federais e estaduais do Sisnama, do SNVS e do Suasa, bem como da responsabilidade do gerador pelo gerenciamento de resíduos, consoante o estabelecido nesta lei e no Art. 12. A União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios organizarão e manterão, de forma conjunta, o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir), articulado com o Sinisa e o Sinima (BRASIL, 2010).

A NBR 8.419/1992, emanada da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define da seguinte forma os aterros sanitários: Aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário (1992). Nesse sentido, Costa e Ribeiro (2013) também destacam a aludida norma técnica asseverando que “trata-se de uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”.

A NBR 10.004/2004 também classifica os resíduos sólidos em classe I ou perigosos: são aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade ou da morbidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. O lodo pode ser enquadrado na classe II-A (não inertes), que podem apresentar características de biodegradabilidade ou solubilidade. Considerando que o lodo de ETE é um resíduo sólido e pode ser enquadrado como classe II-A (não inertes) o mesmo pode ser contido em aterros.

A operação de um aterro pode considerar na deposição de resíduos em células, que são compactados e recobertos com solo ou materiais inertes com controle de variáveis técnicas e ambientais. No caso do lodo, a disposição é feita em células previamente impermeabilizadas. Em seguida à disposição, é realizada a cobertura por uma camada de terra. A atividade de degradação é normalmente anaeróbia, lenta e com produção de metano, que normalmente é queimado, embora possa ser aproveitado, segundo Batista (2015).

Não existem requisitos de qualidade referentes à composição dos lodos de esgotos para disposição em aterros sanitários. A prática mais usual no Brasil é a codisposição com o lixo urbano. Entretanto, para dispor o lodo é preciso que esse tenha pelo menos 30% de sólidos, de outra forma dificulta-se a compactação e o trabalho das máquinas sobre o aterro (JORDÃO & PESSOA, 2005).

### 2.3.3 Uso agrícola

Nos últimos 20 anos a legislação e normas do uso agrícola na agricultura tem tomado destaque. Nesse sentido pensa-se em normas federais em diferentes esferas e estaduais. Uma das principais diretrizes quanto a aplicação de lodos de sistema de tratamento biológico em áreas agrícolas é a norma técnica P 4230/1999 da CETESB. Essa norma apresenta a caracterização do efluente, a caracterização do solo que receberá a aplicação do lodo, as culturas aptas, a taxa de aplicação e o monitoramento. Destaca ainda: a profundidade de 1,20 metros mínima para a zona vadosa na época da aplicação, independentemente do tipo de solo. Bem como indica o uso de práticas conservacionistas em áreas com declividade mais acentuada e/ou solos arenosos, ou seja, áreas mais susceptíveis à erosão, nelas deve-se ter cuidado quanto ao carreamento de nutrientes e sais minerais presentes no solo, com aplicação de lodo, para que não atinja as partes mais baixas do relevo ou corpos d'água.

A resolução Conama 375/2006 é um marco federal importante que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Trata da redução de patógenos e vetores para aplicação em solo agrícola, e em seu Art. 7º apresenta diretrizes para a caracterização do lodo e produtos derivados quanto ao potencial agrônômico, substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos e agentes patógenos, estabilidade e requisitos mínimos da qualidade do lodo.

Nela, quanto ao monitoramento, indica a frequência da caracterização do lodo produzido de acordo com a quantidade de lodo ou produto derivado destinado para aplicação na agricultura em toneladas/ano. Já o Art. 12º descreve a proibição da utilização de qualquer

classe de lama de latrina ou derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível esteja em contato com o solo, ressalta que após o lodo de esgoto ser aplicado nas pastagens, estas só poderão ser implantadas após um período de 24 meses e as culturas cuja as raízes sejam comestíveis no período de 48 meses da última aplicação.

A utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação respeitada às restrições da resolução Conama 375/2006. A resolução veta o uso de lodo em unidades de conservação exceto áreas de proteção ambiental, área de preservação permanente, em áreas de proteção aos mananciais (definidas por legislações estaduais e municipais), áreas de captação de água para abastecimento público, balneários, e devem distar no mínimo a 100 metros de poços rasos.

A resolução do Conama 375/2006 define quais são as classes de lodo de esgoto ou produto derivados e suas concentrações de patógenos permitidos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Classes de lodo de esgoto ou produto derivado e agentes patogênicos.

Tipo de lodo de esgoto ou Produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <math>10^3</math> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos <math>0,25</math> ovo / g de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus <math>0,25</math> UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <math>10^6</math> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos <math>10</math> ovos / g de ST

Legenda: ST: Sólidos Totais, NMP: Número Mais Provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa. Fonte: Melo (2016)

A resolução informa que somente será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.

O Anexo I da resolução do Conama 375/2006 trata do processo de redução de agentes patogênicos, sugerindo a digestão aeróbia com retenções mínimas de 40 dias a 20°C ou por 60 dias a 15°C; ou secagem em leitos de areia com um período mínimo de 3 meses; digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35-55°C ou de 60 dias a 20°C.

Em relação à declividade das parcelas em área agrícola a resolução do Conama 375/2006 define que declividades inferiores a 10% o lodo pode ser aplicado sem incorporação, entre 11 e 15% o lodo aplicado deve ser incorporado ao solo, de 16 a 18% a aplicação deverá ser de forma sub superficial em sulcos e de 19 a 25% aplicação ocorrerá em covas. Em áreas florestais o lodo pode ser aplicado sem incorporação até declividades de 25%. É vetado a aplicação em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 metros na cota mais baixa do terreno.

Em 2009, considerando a Lei Federal Nº 6.894/1980, o Decreto nº. 4.954/2004 e Resolução Conama 375/2006 o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) regulamenta o uso do lodo segundo duas instruções normativas (IN) nº 25/2009 e IN nº 27/2006.

A primeira IN trata das definições, especificações e as garantias dos fertilizantes orgânicos. Nela são definidas quatro classes de fertilizantes orgânicos, onde as classes C e D citam o emprego do lodo. A classe C é um produto que utiliza como matéria prima qualquer quantidade gerada nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta mista ou indiferenciada, lodos gerados em estações de tratamento de esgoto, lodos industriais e agroindustriais de sistemas de tratamento de águas residuárias contendo qualquer quantidade de despejos sanitários, todos com seu uso autorizado pelo órgão ambiental, resultando em produto de utilização segura na agricultura. Enquanto que a classe D é um fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura. Vale destacar que as especificações e garantias mínimas para fertilizantes orgânicos misto e composto são: umidade máxima de 50 a 70% para classe C e acima de 70 % para a classe D, com pH mínimo de 6,0.

A IN nº 27/2006, estabelece limites de agentes fitotóxicos, tais como, metais pesados tóxicos (Arsênio, Cádmio, Chumbo), pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para planta. Nesse sentido o MAPA permite que o lodo e produtos derivados sejam tratados a ponto de se transformar em um composto orgânico sob a forma de fertilizante, ou seja, a estação pode ter uma unidade para transformar esse lodo em um produto, fornecendo assim um valor agregado à destinação final desse resíduo.

A aplicação de lodo de ETE em terras agrícolas é considerada uma boa opção prática (VIEIRA et al., 2011). O seu emprego na agricultura parece ser a forma mais comum e promissora (TRAZZI, 2011; CALDEIRA et al., 2012). Diversos estudos abordam o potencial do biossólido na incorporação de substratos. A utilização racional do lodo em áreas agrícolas,

além de atender a necessidade de reciclagem e minimizar o problema de descarte dos resíduos industriais, contribui para a produção de fertilizante orgânico e como condicionador de solos (SOUTO et al., 2005).

Estudos comprovam que a aplicação de lodo pode melhorar a qualidade do solo, com aumento dos teores de matéria orgânica, nitrogênio, magnésio, potássio, fósforo, cálcio e capacidade de troca catiônica (CTC) da condutividade elétrica, do carbono orgânico total e da atividade microbiana. Mas outros autores destacam que a aplicação do lodo pode causar acúmulo de metais no solo e em plantas, além de apresentar risco de contaminação das águas subterrâneas com nitrato (PEREIRA; GARCIA, 2017). Sendo assim, essa alternativa traz benefícios, mas o seu emprego deve ser monitorado para não gerar impactos decorrentes da operação.

#### 2.3.4 Combustível

Vasques (2012) relatou que todos os resultados encontrados em seu estudo indicaram a possibilidade do uso do lodo têxtil como biomassa combustível, principalmente em função da potencialidade energética verificada, além de ser importante quando ativado termicamente. A mesma afirmação foi feita por Borges et al. (2008), ao analisar lodo doméstico e de indústrias de celulose e papel. Mocelin et al. (2007) em seu estudo obteve 17% de óleos combustíveis com 4,5% de hidrocarbonetos alifáticos e poder calorífico de 34,54 kJ/g do lodo de esgoto sanitário. Na União Europeia as lamas secas têm sido utilizadas como combustível em centrais elétricas alimentadas a carvão (JONES, 2008).

#### 2.3.5 Oxidação Úmida

Oxidação úmida consiste na oxidação de poluentes orgânicos e inorgânicos a temperatura média (150 – 360 ° C) e alta pressão (30 – 250bar), utilizando oxigênio puro como agente oxidante (CHUNG et al., 2009). Sendo uma solução alternativa à incineração de lodo de esgoto. Por outro lado, o alto custo de capital e os problemas operacionais são sérias desvantagens nessa tecnologia (BERTANZA et al., 2015).

Para Sperling (2014) a oxidação úmida baseia-se na capacidade da matéria orgânica dissolvida ou particulada presente em um líquido de ser oxidada a temperaturas entre 100 e 374<sup>0</sup>C, o ponto crítico da água. Estudos econômicos comparativos para tratamento de efluentes com até 20 % de sólidos indicam que, apesar da oxidação úmida apresentar um custo de implantação superior ao de um incinerador, seu custo de operação é bem inferior, devido a reduzida demanda por fonte de energia externa ao sistema.

### 2.3.6 Recuperação de área degradada

A aplicação de lodos em áreas degradadas traz benefícios às propriedades físicas do solo, desempenhando o papel de condicionador do solo, melhorando a formação de agregados, a infiltração, a retenção de água e a aeração do solo (TSUTIYA, 2000).

A recuperação de áreas degradadas, associada ao uso do lodo de esgoto, com espécies florestais nativas, possui as mesmas vantagens apontadas para o uso do resíduo em plantios florestais comerciais segundo (BATISTA, 2015), onde ocorre a redução dos custos com fertilizantes em áreas geralmente extensas, particularmente quanto a reposição de N e P; a absorção de nutrientes durante boa parte do ano pelas raízes perenes (lenta liberação dos elementos), geralmente explorando grandes volumes de solo; a capacidade de imobilizar grandes quantidades de nutrientes e de metais pesados pela grande produção e distribuição de carbono orgânico; a não associação, em geral, do produto florestal final com a produção de alimentos, propiciando baixos riscos à saúde pública.

Disposição de altas doses de lodo em locais drasticamente alterados, como áreas de mineração, onde o solo não oferece condições ao desenvolvimento e fixação da vegetação, em função da falta de matéria orgânica e de nutrientes no solo não é viável sua disposição (LARA, 2014).

Segundo a resolução CONAMA 375/06 o lodo classificado como tipo A tem melhor qualidade (menos bactérias e vírus) e pode ser usado na agricultura, no caso da classificação B e C existe o risco de contaminação dos alimentos plantados em virtude da quantidade de microrganismos existentes, contudo o os lodos B e C dependendo do seu manejo e área poderia ser empregado em recuperação de áreas degradadas. Aplicação do lodo de esgoto sobre a superfície do terreno (seguida ou não de incorporação) pode ocorrer em: sulcos; covas; por injeção sub superficial e deve seguir um planejamento e etapas para a recuperação de áreas degradadas.

### 2.3.7 Uso industrial

Uma das alternativas existentes para a disposição final adequada de lodo de ETE é a sua incorporação em produtos já fabricados, necessitando a comprovação por meio de estudos. O lodo pode ser utilizado na construção civil através da fabricação de produtos cerâmicos, da incorporação em argamassas e concretos, como também na substituição do agregado miúdo na fabricação de argamassas e concretos (MARANGONI, 2018; LARA, 2014).

Geyer (2001) obteve resultados que mostram que a cinza de lodo pode ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante em “filer”, em até 20%. Fontes (2003) analisou as potencialidades da cinza de lodo de ETE como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland e os resultados mostraram que o uso é viável em até 30% devido a uma melhoria nas propriedades investigativas, além de trazer benefícios econômicos pela redução no consumo de cimento.

Segundo a pesquisa de Malhotra e Mehta (1996), os benefícios do uso de adições minerais no cimento ou em concreto podem ser divididos em três categorias: benefícios de engenharia, benefícios econômicos e benefícios ecológicos.

### 2.3.8 *Landfarming*

O *landfarming* é uma alternativa de tratamento e disposição final em que o substrato orgânico é degradado, biologicamente, pelos microrganismos presentes no perfil arável do solo (até 20 cm) (BATISTA, 2015). De acordo com Santos (2004), este tipo de disposição do lodo no solo é conhecido também como tratamento no solo. Tem como objetivo utilizar o solo como um sistema de tratamento, onde uma área recebe doses elevadas de lodo por vários anos. O solo passa a ser o suporte da atividade biológica, retenção de metais, local de bio-oxidação, o que degradara a matéria orgânica (LARA, 2014).

A norma NBR 13894/97 fixa as condições exigíveis para o tratamento no solo de resíduos sólidos industriais suscetíveis biodegradação, para a execução do projeto, construção, operação e a manutenção da unidade devem ser realizados de forma a elevar ao máximo a degradação, a transformação e/ou imobilização de constituintes na zona de tratamento, respeitando todas as condições de projeto e operação. A instalação deve possuir um registro de operação que deve ser mantido até o fim de sua vida útil, incluindo o período de pós-encerramento. No Brasil o *landfarming* tem sido utilizado em alguns poucos casos para resíduos industriais, como na refinaria Presidente Vargas da Petrobrás no Paraná (ANDREOLI, 2006).

### 2.3.9 Aterro com *bags*/ Exclusivo (aterro exclusivo de *bag*, mas fala de geotêxtil e geomembrana, mas não fala da *bag*)

Dentre os processos disponíveis para a desidratação do lodo, o uso de geotêxtil se destaca por proporcionar uma série de benefícios técnicos, operacionais e econômicos. Segundo Miki et al. (2006) o papel da geomembrana na higienização e secagem do lodo é reduzir o seu volume, operar com pequenos ou grandes volumes deste material, diminuir o

espaço de armazenamento, possibilitar o reaproveitamento dos sólidos, controlar a utilização de produtos químicos, reduzir o consumo de energia elétrica, diminuir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) entre outros.

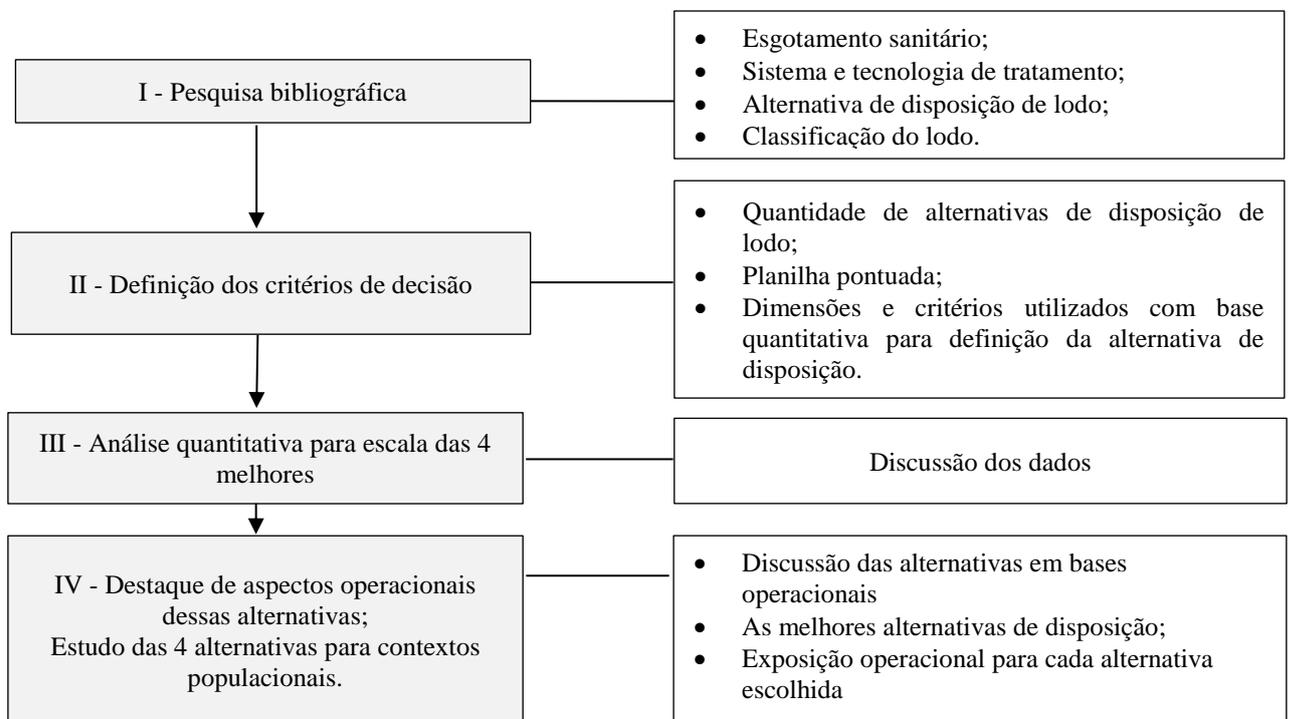
Para desidratação de lodo em ETE's os sacos são colocados diretamente sobre uma superfície preparada e a drenagem inicial em poucas horas concentra sólidos a 15% nas bolsas que serão seladas e removidas da unidade. Os sacos podem ainda ser armazenados a céu aberto para desaguamento e evaporação final que entre 10 a 15 dias elevam o teor de umidade entre 60 a 65% e então são levados para disposição final (SNATURAL AMBIENTE, 2017).

O aterro sanitário exclusivo de bags é construído, um revestimento de geomembrana é instalado para criar uma barreira entre os resíduos que são despejados no aterro e o solo abaixo dele. Os revestimentos de geomembrana ajudam a direcionar o lixiviado adequadamente para um local de coleta retornando para o ponto de tratamento inicial, em vez de infiltrar no solo. Uma alternativa ao descarte das bags e o empilhamento dos sacos a área de desaguamento e posterior de recuperação com sistema de cobertura, drenagem e monitoramento a ser implantado após o término da operação da área caso não se opte por esvaziar os sacos (SNATURAL AMBIENTE, 2017).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa adotada envolve quatro etapas (Figura 2): (I) Pesquisa bibliográfica; (II) Definição dos critérios de decisão; (III) Desenvolvimento da metodologia de análise de disposição de lodo de esgoto e indicação de tecnologias segundo Vanzetto (2012); e (IV) Aplicação da metodologia de Matriz de Avaliação com as tecnologias indicadas para dois contextos populacionais.

**Figura 2.** Fluxograma das etapas de metodologia de pesquisa utilizada no presente estudo.



#### 3.1 Pesquisa bibliográfica

Como primeira etapa da metodologia da pesquisa, realizou-se levantamento bibliográfico apresentado no item 3, com o objetivo de focar nas pesquisas científicas aplicadas ao tema do trabalho, no qual o mecanismo de busca de observação ocorreu no Google acadêmico, Scielo e Abes. As palavras chaves utilizadas na pesquisa científica foram: “*sludge*”, “disposição de lodo”, “ETE”, destacando os tipos de disposição de lodo tratado. Tais atividades auxiliaram na abordagem do problema, na obtenção de dados, na escolha dos critérios e dos métodos de apoio à decisão.

### 3.2 Definição dos critérios de decisão

Após a revisão bibliográfica definiu-se as alternativas de disposição de lodo que seriam analisadas por matriz de avaliação. Detalhou-se a pesquisa tendo como foco seus condicionantes e a definição de critérios de decisão. Nesta etapa, tomou-se como base a matriz de avaliação e decisão de Vanzetto (2012), suprimindo critérios e alterando valores de ponderação. Tal modificação ocorreu, pois, a matriz citada foi desenvolvida para desaguamento de lodo e está para disposição de lodo. A definição dos pesos e critérios tomou como base a matriz de Vanzetto (2012), pesquisa bibliográfica e a percepção do autor. Sendo assim estabelecidos 22 critérios de decisão distribuídos em três dimensões: ambiental, social e tecnológico (Tabela 3).

**Tabela 3.** Apresentação dos critérios das avaliações nos níveis Ambiental, Social e Tecnológico.

DIMENSÃO	CRITÉRIOS
<b>Ambiental</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminação do lençol freático</li> <li>• Geração de rejeitos</li> <li>• Impactos negativos na implantação</li> <li>• Impactos negativos na operação Potencial poluidor do lodo</li> <li>• Produção de ruído e vibração</li> <li>• Produção do odor Supressão vegetal</li> </ul>
<b>Social</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não aceitabilidade do processo de disposição do lodo</li> <li>• Alteração na paisagem</li> <li>• Não eliminação de organismos patogênicos</li> <li>• Emissão de gases e outros subprodutos</li> <li>• Não proteção da segurança e da saúde no trabalho</li> <li>• Reclamação da vizinhança</li> </ul>
<b>Tecnológica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexibilidade de construção e instalação</li> <li>• Complexidade de operação</li> <li>• Não confiabilidade do processo</li> <li>• Custo de operação e manutenção</li> <li>• Demanda por área</li> <li>• Demanda por energia elétrica</li> <li>• Dificuldade de transporte do lodo</li> <li>• Riscos associados ao clima</li> </ul>

Fonte: Autor (2019).

#### 3.2.1 Dimensão ambiental

Nesta dimensão foram analisados os critérios associados à disposição de lodo com relação ao ambiente considerando a sua possível relação com: a água subterrânea, o solo, o ar, a flora e fauna. Esse enfoque foi considerado para a classificação das alternativas de disposição de lodo, pois permite identificar as possíveis alterações ambientais (ANJOS;

UBALDO, 2015). Os critérios selecionados buscaram avaliar, de forma geral, os fenômenos diversos que podem inferir a disposição em áreas diretamente ou indiretamente afetadas.

### 3.2.2 Contaminação do lençol freático

A função de filtragem do solo é um importante serviço ecossistêmico para a proteção das águas subterrâneas e superficiais (KEESSTRA et al., 2012). Segundo Souza (2009), o solo atua como filtro natural de poluentes e serve também como meio para os processos de sorção e degradação desses poluentes. Quando o solo não consegue atenuar ou retardar as substâncias contidas no lodo em algum momento da disposição em sua implantação, operação e manutenção pode causar contaminação do lençol freático. Das alternativas apresentadas na revisão aquelas que estão sujeitas a contaminação do lençol freático no final da sua vida útil são: recuperação de área degradada, uso agrícola e *landfarming*.

### 3.2.3 Geração de rejeito (Rejeito final pós tratamento)

A geração de rejeito final em algumas alternativas de disposição se dá através de um subproduto gerado a partir da disposição final. A alternativa de incineração, combustível e oxidação úmida ao final gera um volume de cinza residual do lodo no qual pode ser utilizado para a fabricação de tijolos. O aterro sanitário gera o subproduto metano, onde este é tratado no local e o material decomposto que fica armazenado. Ao uso agrícola e recuperação de área degradada no final pode causar acúmulo de metais no solo e em plantas, bem como matéria orgânica decomposta. Aterro exclusivo com *bags* no final de sua vida útil gera um volume de massa decomposta.

### 3.2.4 Impactos negativos na implantação

Neste quesito serão considerados aspectos de implantação associados à terraplanagem, compactação e revolvimento do solo que podem ser computadas em tempo de trabalho. Assim obras com maior proporção ou com maior demanda de área terão impacto maior. As alternativas sujeitas a impactos negativos durante a implantação são: incineração, combustível, oxidação úmida, uso industrial, *landfarming* e uso de aterros exclusivos com *bags* que conseqüentemente geram poluição sonora e vibrações, alteram a paisagem, removem a vegetação.

### 3.2.5 Impactos negativos na operação

Para a operação serão considerados equipamentos empregados na operação com aumento de trânsito no local. Dentre as alternativas analisadas as passíveis a este impacto são: incineração, combustível, oxidação úmida e uso industrial. A perda do solo por erosão, atração e proliferação de insetos e roedores são os aspectos negativos relacionados às alternativas aterro sanitário, uso agrícola e recuperação de área degradada.

### 3.2.6 Potencial poluidor do lodo

Esse critério está relacionado ao tipo de disposição do lodo final. Algumas alternativas possuem maior risco de causar poluição ao final, entre elas destacam-se: uso agrícola, *landfarming* e recuperação de área degradada e aterro exclusivo, com liberação de metais e patógenos. Segundo Conama 375/06 a disposição de lodo em uso agrícola só será permitida dentre os critérios da Tabela 4 a seguir:

**Tabela 4.** Classes de lodo de esgoto ou produto derivado e agentes patogênicos.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>3</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>6</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

Legenda: Sólidos Totais (ST); Número Mais Provável (NMP); Unidade Formadora de Foco (UFF) e Unidade Formadora de Placa (UFP).

### 3.2.7 Produção de Ruído e Vibração (Operação)

Entende-se por ruído um agente contaminante de tipo físico, é um som indesejável e, desta forma, incômodo. É definido como o som ou grupo de sons de tal amplitude que pode ocasionar adoecimentos ou interferência no processo de comunicação (FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2016). Tratores, pás carregadeiras e caminhões mais frequentes na operação das alternativas as tornam mais propensas a produção de ruídos e vibrações. As alternativas passíveis a este critério são: aterro sanitário, uso agrícola, recuperação de área degradada, *landfarming* que demandam durante a operação maior número de horas desses equipamentos. Outras alternativas como incineração, combustível, oxidação úmida, uso

industrial e aterro exclusivo com *bags* produzem em menor quantidade de vibração e ruídos durante o processo na operação por utilizarem equipamentos com menor índice de vibração e ruídos.

### 3.2.8 Produção do Odor (Operação)

Segundo Fernandes (2000), quanto mais o lodo assemelhar-se à matéria orgânica “fresca”, maior será seu potencial de putrefação, de produção de odores desagradáveis, como também maior será a concentração de microrganismos patogênicos. As permissíveis alternativas de disposição de lodo sujeitas a esse critério durante seu funcionamento são: Aterro sanitário, uso agrícola, recuperação de área degradada, *landfarming* e aterro exclusivo de *bags*, estão sujeitos a produção de odor. Sendo assim, as alternativas durante o processo de operação que estão sujeitas a menor produção de odor são: incineração, combustível, oxidação úmida e uso industrial.

### 3.2.9 Supressão vegetal

Este critério é caracterizado como a retirada de uma parcela de vegetação dentro de uma área de um imóvel, sendo destinada a diversos usos. Todas as alternativas suprimem, a menos que seja utilizada uma área já desmatada. Entretanto, algumas alternativas demandam de maior área e conseqüentemente impactam mais, tais alternativas que se enquadram nesse critério são: incineração, combustível, oxidação úmida, uso industrial, *landfarming* e aterro exclusivo de “*bags*”. Enquanto que as alternativas que demandam pouca supressão vegetal ou que já possuem área desmatada são: aterro sanitário, uso agrícola e recuperação de área degradada.

### 3.2.10 Dimensão social

A utilização de critérios sociais propõe tratar assuntos relacionados ao bem-estar da população e dos operadores das respectivas alternativas de disposição de lodo, que direta ou indiretamente podem ser afetados pelos efeitos da disposição.

### 3.2.11 Não aceitabilidade do processo de disposição do lodo

A não aceitabilidade do processo de disposição do lodo pode ser avaliada sob o ponto de vista da população local e dos trabalhadores em relação às técnicas empregadas a escolha da melhor tecnologia depende das características qualitativa e quantitativa do lodo, e das condições climáticas (FONTANA, 2004). As alternativas sujeitas a não aceitabilidades do

processo de disposição de lodo são: uso agrícola, *landfarming* e combustível, pois no Brasil por questões técnicas, culturais e falta de informação por parte população, sobre o uso do lodo em algumas técnicas, não é bem visto como uma alternativa de fertilizante.

### 3.2.12 Alteração na paisagem

O critério paisagem está vinculado a alteração da estética local vivenciada pela comunidade do entorno que visualmente estão associadas ao desmatamento, próximo a um corpo hídrico decorrentes da alternativa de disposição de lodo (SANTOS, 2016), bem como a implantação de estruturas industriais. A alteração da paisagem está mais fortemente associada às alternativas de aterro exclusivo com *bags* e *landfarming*, incineração, combustível, oxidação úmida. E o aterro sanitário, uso agrícola, recuperação de área degradada estão menos sujeitas a essa alteração.

### 3.2.13 Não eliminação de organismos patogênicos

A não remoção de patógenos pode ser considerada um dos fatores que influenciam a disposição final do lodo, pois, para alternativas de disposição específicas, podem apresentar organismos patogênicos em sua disposição final, as alternativas sujeitas a patogenicidades são *landfarming*, uso agrícola, recuperação de área degradada e aterro com *bags*, as outras alternativas que durante o processo de disposição final não apresentam patogenicidade são: incineração, combustível, oxidação úmida e uso industrial associado principalmente ao tratamento térmico que estão sujeitas.

### 3.2.14 Emissão de gases e outros subprodutos

A emissão de gases e subprodutos tóxicos é um critério que trata do tipo de gás que é emanado e quais são os subprodutos tóxicos gerados da disposição final do lodo e que podem vir afetar a sociedade (VANZETTO, 2012). Alternativas como oxidação úmida, incineração, combustível, aterro sanitário e uso industrial podem apresentar emissão de gases e subprodutos como cinzas. Já o uso agrícola, recuperação de área degradada, *landfarming* e aterro exclusivo com *bags* apresentam em menor quantidade dessa emissão.

### 3.2.15 Não proteção a segurança e a saúde no trabalho (Operação)

Este critério está relacionado à segurança da operação de determinado processo de disposição do lodo e ao grau de operação manual, quanto maior o grau de manuseio exigido maior o risco a não proteção a segurança e saúde no trabalho. Alternativas como incineração,

uso industrial, oxidação úmida e combustível estão sujeitas a não proteção a segurança do trabalhador. As outras alternativas que apresentam um grau menor a não segurança do trabalhador, são: aterro sanitário, uso agrícola, recuperação de área degradada, *landfarming* e aterro exclusivo com *bags*.

#### 3.2.16 Reclamação da vizinhança

Trata-se do grau de aceitação da vizinhança quanto às alterações inerentes a operação no trânsito, qualidade do ar e da água, bem como no aspecto estético local. Em geral uso agrícola, *landfarming*, aterro sanitário e recuperação de área degradada e aterro exclusivos com *bags* são mais susceptíveis à reclamação da vizinhança pois estão visíveis. A incineração, geração de combustível, oxidação úmida e uso industrial ficam restritas a plantas industriais que são menos abertas a população, tendem a não ter reclamações.

#### 3.2.17 Dimensão Técnica

Os critérios a serem considerados nesta dimensão dizem respeito às implicações, climáticas, operacionais, tempo de operação, manutenção e eficiência da alternativa de disposição do lodo escolhida. Por meio desses critérios, pode ser avaliada a complexidade de cada processo.

#### 3.2.18 Complexidade de construção e instalação

A complexidade de construção e instalação de uma alternativa de disposição de lodo exige uma área grande como *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags*, já outras possuem equipamentos complexo que exige um nível de conhecimento superior como incineração, oxidação úmida, uso industrial, combustível. O aterro sanitário exige área, mas nesse trabalho se considerou que a estrutura está instalada.

#### 3.2.19 Complexidade de operação

A complexidade operacional depende fundamentalmente da tecnologia empregada na disposição de lodo e nos equipamentos incorporados ao sistema. Alguns demandam de equipamentos projetados especificamente para a operação como: incineração, oxidação úmida, uso industrial, combustível, enquanto que outros empregam tecnologias da construção civil e agricultura na sua operação que podem ser: aterro sanitário, recuperação de área degradada, uso agrícola, *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags* sendo assim mais simples.

### 3.2.20 Não confiabilidade do processo

A não confiabilidade em um processo em uma alternativa de disposição do lodo se refere a vários fatores, como por exemplo, o grau de conhecimento, a escala de operação industrial ou piloto, e a existência de dados para comparação e análise. A incineração, o aterro sanitário e o aterro exclusivo de *bags* têm dados sistematizados em escala industrial, entretanto, a oxidação úmida, a geração de combustível e uso industrial ainda estão limitados ao grau de conhecimento em escala piloto.

### 3.2.21 Custo de operação e manutenção

Este critério é mensurado por meio da comparação dos custos necessários para o funcionamento e manutenção de cada alternativa de disposição em escolhida. Alternativas que demandam tecnologia mais avançada com equipamentos específicos como incineração, oxidação úmida, uso industrial e geração de combustível terão um custo mais elevado. Já outras que empregam equipamentos disponíveis no mercado como aterro sanitário, recuperação de área degradada, uso agrícola, *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags* terão custo de operação e manutenção menores.

### 3.2.22 Demanda por área

As alternativas que demandam mais área, conseqüentemente produzem mais barulho na implantação, são elas: aterro sanitário, recuperação de área degradada, uso agrícola, *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags*, conseqüentemente maior será o impacto ambiental provocado por ela, visto que podem ser necessárias ações como desmatamento, compactação do solo, afugentar a fauna. Outras necessitam de uma quantidade de área menor na sua implantação e operação: incineração, oxidação úmida, uso industrial e combustível.

### 3.2.23 Demanda por energia elétrica

As alternativas de disposição de lodo podem ser classificadas em demandantes ou não de energia. O aspecto que deve ser levado em consideração é a quantidade de energia produzida no local, a ser superior à quantidade de energia demandada pelo processo de tratamento a ser implantado, assim se tornando um fator limitante para a implantação das alternativas de disposição. As alternativas que mais demandam energia são: incineração, oxidação úmida, uso industrial, combustível, as outras que demandam, mas em menor quantidade, são elas: aterro

sanitário, recuperação de área degradada, uso agrícola, *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags*.

#### 3.2.24 Dificuldade de transporte do lodo

Em relação a disposição do lodo, a alternativa pode gerar custo altos de transporte em virtude da distância, dos equipamentos para transporte, por exemplo, segundo Bittencourt (2017) para o uso de área agrícola com uma distância maior que 80 Km, se torna inviável. Às outras alternativas (aterro sanitário, recuperação de área degradada, *landfarming* e aterro sanitário exclusivo com *bags*) também tem dificuldade no transporte, principalmente se não estiverem perto das estações de tratamento do lodo. As alternativas passíveis a implantação, ou seja, que podem ser implantadas perto da unidade geradora de lodo, são elas: incineração, oxidação úmida, uso industrial e combustível.

#### 3.2.25 Susceptibilidade ao clima

Os aspectos climáticos podem influenciar na eficiência dos processos de disposição do lodo, sobretudo disposição agrícolas, aterro sanitário, aterro exclusivo de *bags*, áreas degradadas, devido principalmente ao declínio da evaporação e da percolação de efluente. Portanto, em regiões de clima úmido e chuvoso existe um maior risco operacional associado em virtude da manutenção da umidade do lodo bem como a interação desse lodo com a precipitação, restringindo assim, o período de disposição em algumas alternativas como uso agrícola, recuperação de áreas degradadas, aterro sanitário e *landfarming*.

### 3.3 Desenvolvimento da metodologia de análise tecnológica

Nesta etapa será empregada uma matriz de avaliação que considerará em um eixo os critérios de decisão e em outro a escala de cada critério. O ponto mais crítico desse trabalho é quantificação dos critérios, pois cada um tem seu procedimento próprio de avaliação, será então por uma análise quantitativa que empregará a escala de 1 a 5 considerando as alternativas de disposição existentes levantadas na literatura por meio de planilhas eletrônicas e os pesos foram calculados automaticamente para se evitar que os mesmos ultrapassassem 1 (um) na soma das esferas ambiental, social e técnica, e que cada esfera tivesse o mesmo grau de importância. Tal metodologia foi adaptada de Vanzetto (2012), como apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5.** Compilação dos pesos (escala de 0 a 1) atribuídos aos critérios de avaliação.

<b>Dimensões</b>	<b>Crítérios</b>	<b>Pesos</b>
<b>Dimensão ambiental</b>	Contaminação do lençol freático	0,04
	Geração de rejeitos	0,04
	Impactos negativos na implantação	0,03
	Impactos negativos na operação	0,08
	Potencial poluidor do lodo	0,04
	Produção de ruído e vibração	0,02
	Produção do odor	0,04
	Supressão vegetal	0,04
<b>Total</b>		<b>0,33</b>
<b>Dimensão social</b>	Não aceitabilidade do processo de disposição do lodo	0,05
	Alteração na paisagem	0,05
	Não eliminação de organismos patogênicos	0,05
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07
	Não proteção da segurança e da saúde no trabalho	0,08
	Complexibilidade de construção e instalação	0,02
	Reclamação da vizinhança	0,03
<b>Total</b>		<b>0,35</b>
<b>Dimensão tecnológica</b>	Complexidade de operação	0,03
	Não confiabilidade do processo	0,03
	Custo de operação e manutenção	0,12
	Demanda por área	0,03
	Demanda por energia elétrica	0,03
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03
	Riscos associados ao clima	0,05
<b>Total</b>		<b>0,32</b>
<b>Total Geral</b>		<b>1</b>

Fonte: Modificado de VANZETTO, 2012.

Na tabela de planilha pontuadas o critério com maior peso na dimensão ambiental foram impactos negativos na operação, na dimensão social foi o perigo na proteção e na segurança e saúde no trabalho e na dimensão tecnológica o custo de operação e manutenção. Nesta tabela foi ponderada também a magnitude do critério considerando o porte variando de 1 a 5 pontos, onde 1 ponto foi para pequenos portes, 3 para médio porte e 5 para grande. O valor total obtido é o somatório da multiplicação do peso *versus* o porte para cada critério impacto nas diversas dimensões para cada alternativa estudada.

Essa forma de se obter dados pode ser usada quando se necessita elencar alternativas ou quando os dados acerca das alternativas são escassos, tratando assim de um instrumento de decisão. Os dados obtidos na planilha pontuada podem ser usados como norteadores no estudo da disposição de lodos de esgotos em condições mais específicas.

### **3.4 Aplicação da metodologia de Matriz de Avaliação com as tecnologias indicadas para dois contextos populacionais**

Na etapa anterior a matriz de avaliação foi aplicada de modo genérico, independente do porte da tecnologia, considerando os aspectos tecnológico, social e ambiental tomando como base o relatado em bibliografia e a percepção do autor.

Nessa etapa foram consideradas as quatro tecnologias com maior pontuação obtida anteriormente contextualizado para dois municípios (X e Y) com população e volume de lodo gerado distinto. A ETE do município X usa tecnologia de leito de secagem e a Y centrífugas. Com base nesses dados, a análise quantitativa foi realizada na tabela de pontuação (considerando o volume de lodo gerado para a pontuação do porte de 1 a 5 tomando como base dados da literatura) sendo selecionado os 4 melhores métodos de tratamento de lodo para esses municípios.

Nessa condição ora uma tecnologia poderá ser de pequeno porte ou de grande porte em função do volume de lodo a ser disposto. Neste contexto, a pontuação das tecnologias será mais assertiva. Como produto, foram obtidas as tecnologias que melhor se aplicam, dentro das quatro testadas nos contextos analisados.

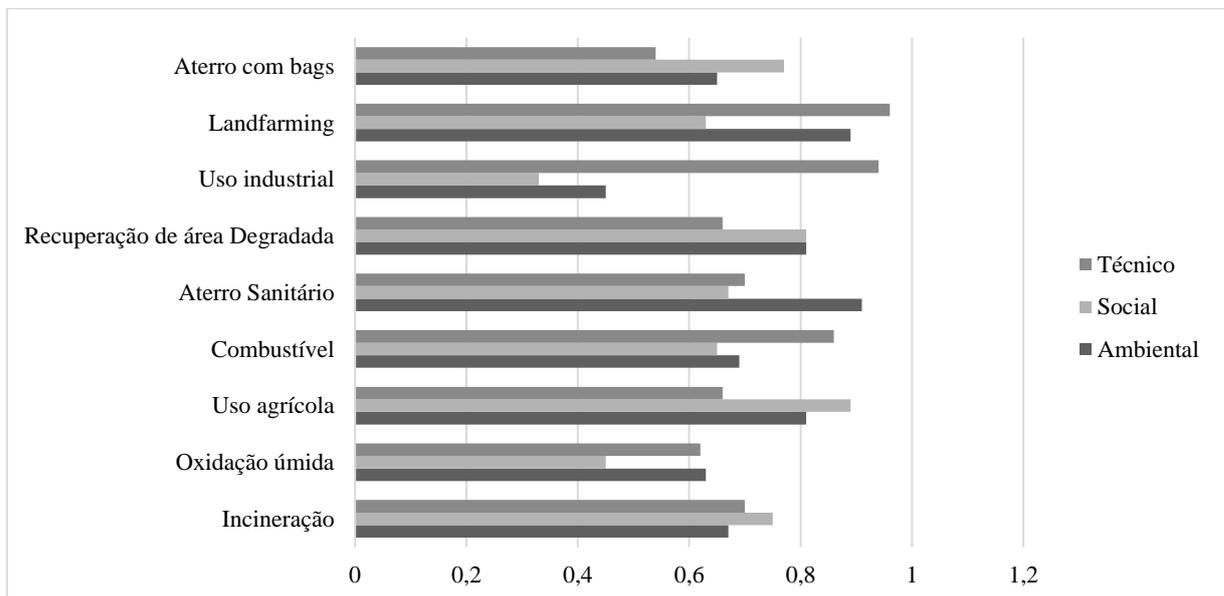
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Melhores alternativas de disposição de lodo

A Figura 3 apresenta a quantificação teórica de lodo das alternativas de disposição para porte pequeno (PP) nas dimensões ambiental, social e técnica. Observando a dimensão ambiental, destacam-se as alternativas: Aterro sanitário (0,91), *landfarming* (0,89) uso agrícola e recuperação de área degradada (0,81) e combustível (0,67), como as 4 melhores alternativas de disposição de lodo. Em relação a dimensão social 4 melhores alternativas de disposição de lodo para porte pequeno são: uso agrícola (0,89) recuperação de área degradada (0,81) aterro com bags (0,77) incineração (0,75).

A dimensão técnica (Figura 3), apresentou como as 4 melhores alternativas de disposição de lodo para porte pequeno o *landfarming* (0,96), uso industrial (0,94), combustível (0,86) incineração e aterro sanitário (empatados com 0,70).

**Figura 3.** Os dados de lodo nas diferentes alternativas de disposição para porte pequeno (PP) nas dimensões ambiental, social e técnica.

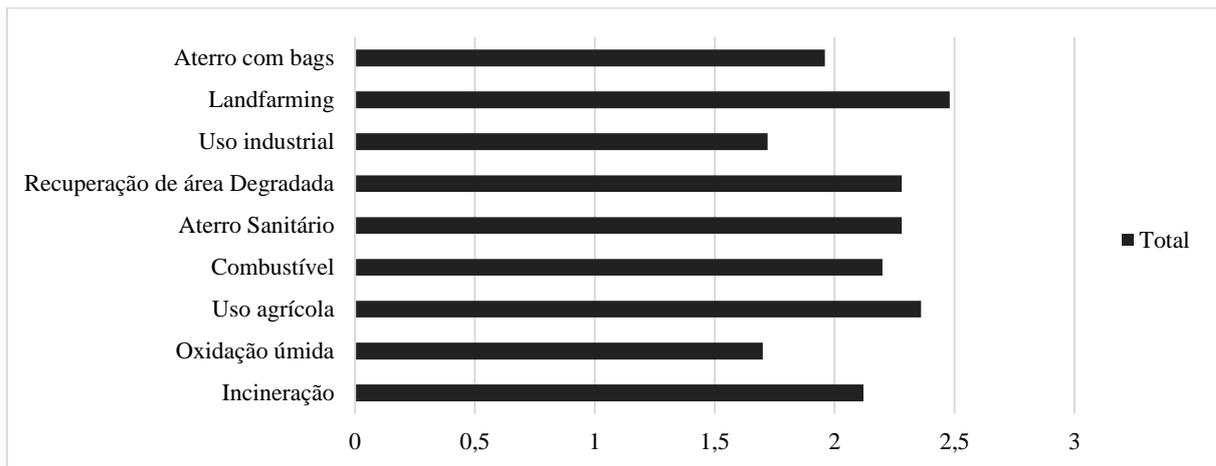


Fonte: Autor, 2019.

A Figura 4 demonstra a soma de todas as dimensões na condição de PP. *Landfarming* se apresentou como a melhor alternativa nas esferas ambiental e técnico ocupando, respectivamente, em segundo e primeiro, que a torna a mais pontuada. O uso agrícola apresentou-se como parte das quatro alternativas melhores pontuadas nas dimensões ambiental e social, ficando em segundo e primeiro, respectivamente. Recuperação de área

degradada e aterro sanitário aparecem na terceira colocação empatados na soma total, respectivamente nas dimensões ambiental e técnico, ambiental e social (Figura 4). A opção combustível aparece em quarto lugar no critério ambiental e terceiro lugar no técnico, ocupando a quarta posição na pontuação total.

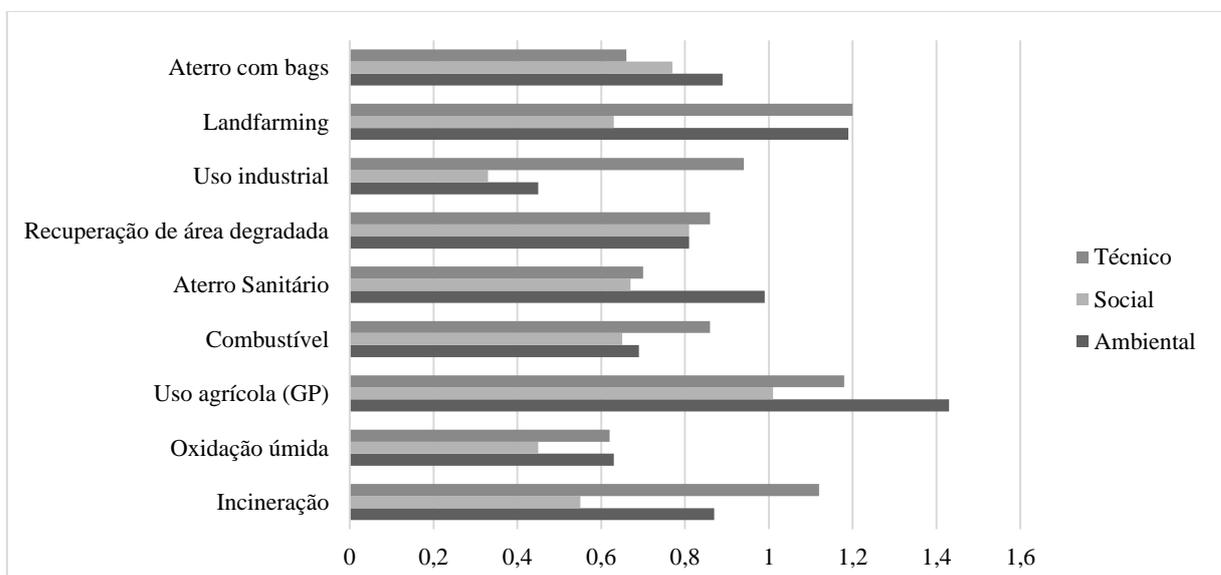
**Figura 4.** Somatório total dos pesos atribuídos nas alternativas de disposição de lodo de pequeno porte.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 5 apresenta a pontuação das alternativas de disposição para porte grande (PG) nas dimensões ambiental, social e técnica.

**Figura 5.** Pontuação das diferentes alternativas de disposição para porte grande (PG) nas dimensões ambiental, social e técnica.



Fonte: Autor, 2019.

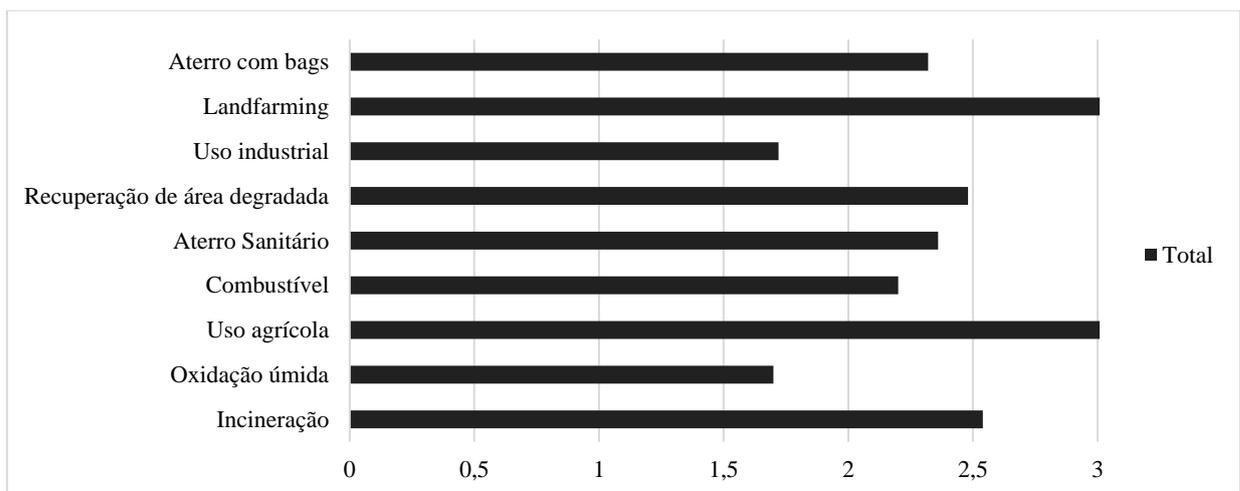
Observando a dimensão ambiental, destaca-se as alternativas: uso agrícola (1,43), *landfarming* (1,19), aterro sanitário (0,99) e aterro com bags (0,89), como as 4 melhores alternativas de disposição de lodo para porte grande.

Em relação a dimensão social, (Figura 5), as 4 melhores alternativas de disposição de lodo para porte grande são: uso agrícola (1,01), recuperação de área degradada (0,81), aterro com bags (0,77) e aterro sanitário (0,67).

A dimensão técnica (Figura 5), apresentou como as 4 melhores alternativas de disposição de lodo para porte grande o *landfarming* (1,20), uso agrícola (1,18), incineração (1,12) e uso industrial (0,94).

A Figura 6 demonstra a soma de todas as dimensões e as alternativas de disposição de lodo de porte grande.

**Figura 6.** Somatório total dos pesos nas dimensões técnica, ambiental e social das alternativas de disposição de lodo de porte grande.



Fonte: Autor, 2019.

O uso agrícola se apresentou como uma das melhores alternativas em todas as esferas o que a faz ser a alternativa com maior pontuação total. O *landfarming* apresentou-se com maiores pontuações, em relação às outras 02 alternativas, nas dimensões ambiental e técnica, ficando em segunda posição na pontuação total (Figura 6). A opção incineração aparece em terceiro na dimensão técnico e quinto na ambiental e em terceiro na pontuação total. Recuperação de área degradada aparece em segundo lugar no critério social e quinto no técnico, ocupando a quarta posição na pontuação total (Figura 6).

## 4.2 Dados para cálculos e aspectos operacionais

O cálculo da massa e do volume de lodo para as ETE X e Y foi obtido considerando os seguintes dados: produção teórica de lodo (PTL) em L/hab.dia conforme o tipo de tratamento; a projeção da população atendida a cada ano; teor de sólidos naturais (TSN) segundo a tecnologia de tratamento; o teor de sólidos desaguado (TSD) considerando o método de desaguamento e a densidade do lodo (DL) conforme Tabela 6 extraídos de dados cedidos da empresa de saneamento básico. Para tanto foram aplicadas as equações abaixo para o cálculo da produção teórica de lodo (PTL) em m<sup>3</sup>/ano, a produção de lodo desaguado (PLD) em m<sup>3</sup>/ano e em ton/ano tendo como exemplo o ano de 2021.

$$\text{PTL (m}^3\text{/ano)} = \text{População atendida} \times 365 \text{ dias} \times \text{PLT (L/hab.dia)} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 01}$$

$$\text{PLD (m}^3\text{/ano)} = \text{PTL (m}^3\text{/ano)} \times (\text{TSN \%} / \text{TSD \%}) \quad \text{Equação 02}$$

$$\text{PLD (ton/ano)} = \text{PLD (m}^3\text{/ano)} \times \text{DL (ton/m}^3\text{)} \quad \text{Equação 03}$$

**Tabela 6.** Exemplo de cálculo da produção total de lodo e produção de lodo desaguado para o ano de 2021.

Dados	ETE X	ETE Y
PTL (L/hab.dia)	5,65	0,68
TSN (%)	1,50	3,70
TSD (%)	30,00	25,00
DL (ton/m <sup>3</sup> )	1,05	1,05
População atendida (2021)	2559	156166
PTL (m <sup>3</sup> /ano)	5277,29	38760,5
PLD (m <sup>3</sup> /ano)	26,38	5690,04
PLD (ton/ano)	27,70	5974,54

Considerando a matriz aplicada para estudos das alternativas e a produção de lodo em volume e massa selecionou-se o Uso Agrícola, *Landfarming*, Área Degradada, Aterro Sanitário e como técnicas finais de disposição de lodo.

### 4.2.1 Uso agrícola

Um projeto de sistema de aplicação de lodos em áreas agrícolas deve abordar os seguintes aspectos: caracterização da instalação de tratamento de efluentes; caracterização do lodo: composição química, patógenos, persistência da matéria orgânica e mineralização do nitrogênio do lodo; caracterização da área que receberá o lodo com declaração de consentimento do uso da propriedade (MELO, 2016). Devem constar plantas planialtimétricas de situação dos locais de aplicação propostos com escala mínima de

1:10.000, abrangendo até 500 m dos limites da aplicação, uma descrição detalhada da área quanto à proteção de erosão e croqui com indicação das declividades das áreas de aplicação, também são importantes. Indicar em planta, as parcelas definidas para fins de caracterização e monitoramento do solo, demarcando-as com base na uniformidade de manejo, na homogeneidade do solo e na posição topográfica, não devendo cada parcela ultrapassar 20 hectares.

Quanto a caracterização do solo na área que receberá o lodo, (MELO, 2016) recomenda que deve ser feita com amostra composta com 20 sub-amostras, de 0 a 20 cm, e analisada quimicamente quanto: pH, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, acidez potencial (H+Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de saturação em bases (V%), acrescidos de condutividade elétrica dos solos.

A aplicação e reaplicação de lodo deverá considerar o benefício agrônômico da utilização do lodo na área, levando em conta o tipo de cultura a ser utilizada e as limitações quanto à aplicação de nitrogênio e metais características do lodo (CETESB, 1999).

Boeira (2004) adotou-se a seguintes equações para aplicação de lodo em solo:

$$T_a = \frac{M_{ls}}{A_d}$$

Onde:

$T_a$  – Taxa de aplicação do lodo (Kg/ha);

$M_{ls}$  – Massa do lodo seco ou desaguado (Kg);

$A_d$  – Área de Cultivo (ha).

Equação 4

Quantidade de Nitrogênio Disponível ( $N_{dis}$ )

$$N_{dis} = T_{mn} \cdot N_{org} + N_{min}$$

Equação 5

$$N_{org} = 4 \% T_a$$

Equação 6

$$N_{min} = 0,5 \% T_a$$

Equação 7

Onde:

$N_{dis}$  – Nitrogênio disponível no lodo seco ou desaguado (Kg/ha);

$N_{org}$  – Nitrogênio orgânico (kg/há);

$T_{mn}$  – Taxa de mineralização do nitrogênio (%);

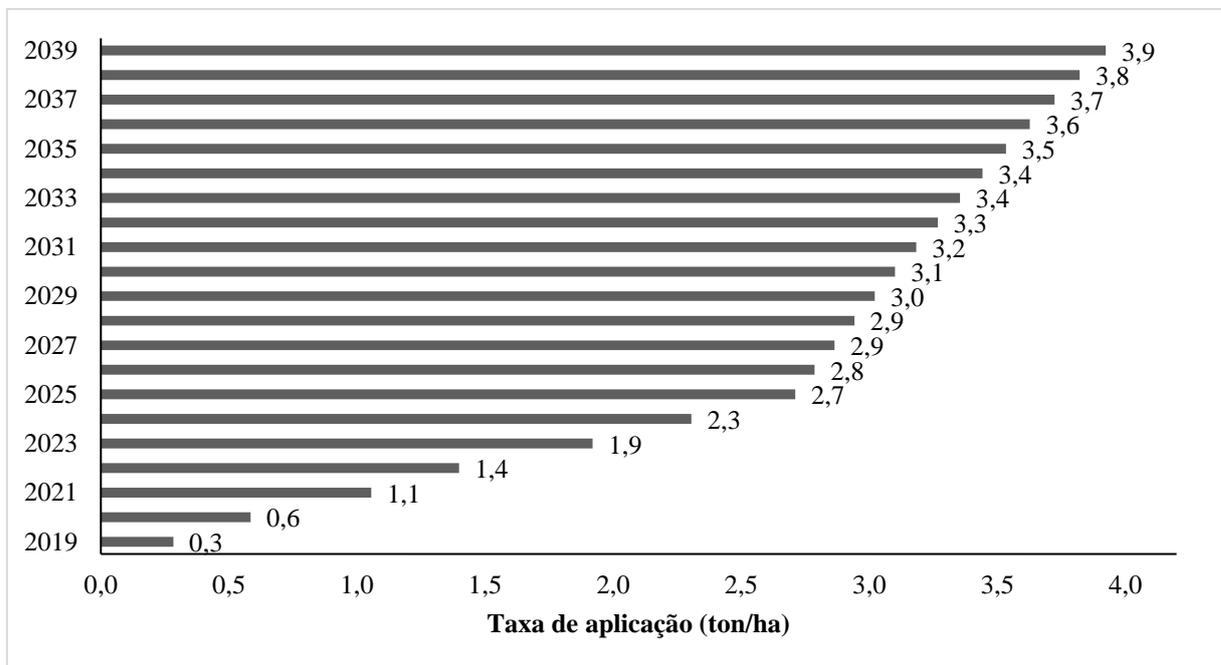
$N_{min}$  – Nitrogênio mineral (kg/ha).

Portanto, a quantidade de Nitrogênio Mineral ( $N_{min}$ ) e orgânico ( $N_{org}$ ) equivale respectivamente a 0,5 e 4% da massa do lodo seco aplicado na área cultivada (BOEIRA, 2004). Para determinação da Taxa de Mineralização de Nitrogênio ( $T_{mn}$ ) utiliza-se os critérios de Dehnr (1994), na qual para ETE X corresponde a 30%, pois a digestão do lodo é aeróbia. Já na ETE Y o lodo é digerido anaerobiamente, sendo assim essa taxa equivale a 20%.

Considerando uma área de cultivo de 25 hectares para destinação do lodo gerado na ETE X e 1000 hectares para ETE Y conforme recomendado Coema (2005), foi obtida a taxa de aplicação do lodo tendo em conta a demanda de adubação de nitrogênio para soja (50 kg /ha) de acordo com no descrito por Instituto Agrônômico (1994) e a produção de lodo desaguado.

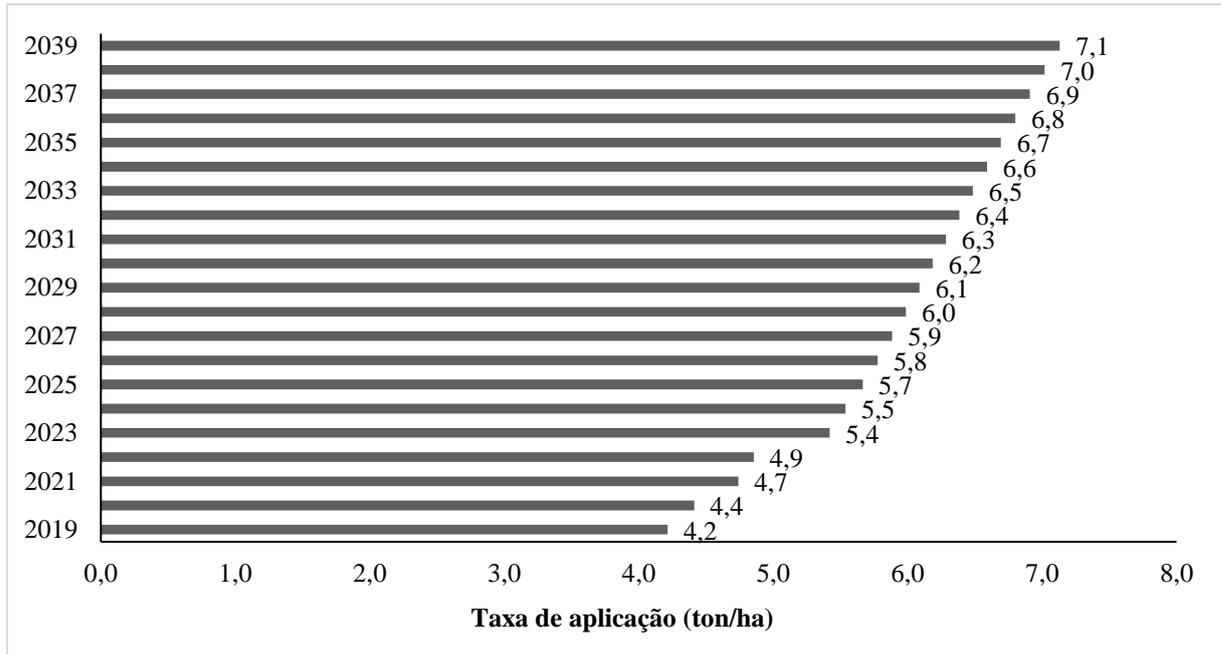
Portanto, a Figura 7 tem se a taxa de aplicação necessária para dispor o lodo da ETE X no período de 20 anos, destaca-se o crescimento da ETE X de 0,3 (ton/ ha.ano) para 3,9 (ton/ ha.ano) no final dos 20 anos, no acumulado terá um total de 56,9 ton.

**Figura 7.** Taxa de aplicação de lodo da ETE X para dispor no período de 20 anos.



Entretanto a ETE Y saiu de 4,2 (ton/ ha.ano) para 7,1 (ton/ ha.ano), devido a maior área de disposição, levando a maior produção de quantidade de lodo. Tendo em vista os resultados obtidos para o uso operacional do lodo de esgoto a ETE Y atenderia uma área de porte grande (Figura 8).

**Figura 8.** Taxa de aplicação de lodo da ETE Y para dispor no período de 20 anos.



Definida a cultura e a taxa de aplicação, deverá ser proposto o plano de manejo da área, compreendendo: indicação em planta das culturas de cada parcela; descrição do manejo detalhando época de plantio e/ou desenvolvimento da cultura e justificativa do plano de manejo considerando a capacidade de estocagem segundo a (CETESB, 1999), o plano de aplicação do lodo e o benefício agrícola.

No Tocantins deve-se levar em questão o fator clima para definir o melhor período para aplicação. Borghi (2015) ressalta que o lodo deve ser aplicado e preparado com gradagem antes da semeadura. Essas áreas o mais recomendado é que sua incorporação seja entre os meses de junho a outubro, ou seja, final do período seco e início do chuvoso. Antes da aplicação o lodo deve ser seco para atingir o teor de sólidos indicado na legislação, mas também receber tratamento específico de acordo com a sua caracterização para controle de patógenos.

Outro ponto a ser destacado é a tomada de medidas de proteção para não causar incômodo à vizinhança pela emissão de odores, mantendo uma distância de quinze metros de vias de domínio público, com relação à proteção das águas deve-se manter distância de dez metros de drenos interceptores, captar as águas superficiais a jusante, e que tenha trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais (MELO, 2016).

A aplicação do lodo deverá ser detalhada e acompanhada em um plano de operação, registros e monitoramento propostos, onde a aplicação do lodo deve estar, necessariamente,

atrelada ao manejo agrícola recomendado para a cultura adotada, assim sendo, os períodos de aplicação devem estar associados ao período de preparo do solo ou desenvolvimento da cultura planejada (CETESB, 1999).

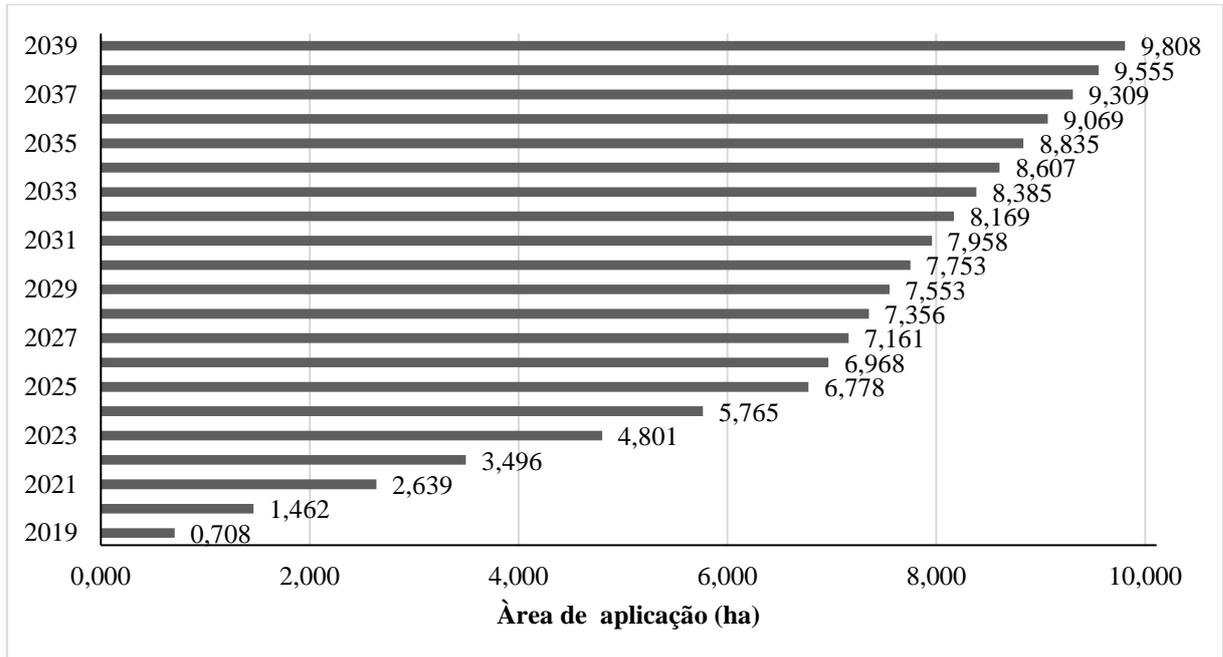
#### 4.2.2 Área degradada

A vantagem econômica da aplicação do lodo de esgoto em áreas degradadas deve-se a sua aquisição gratuita nas estações de tratamento restando ainda o custo de transporte para a sua aplicação. Esse frete dependeria da distância entre a estação de tratamento e a área de recuperação degradada. Visando tornar lodos de esgotos mais estáveis, e conseqüentemente, economicamente mais atrativos e menos perigosos, processos de estabilização por radiação solar podem ser aplicados.

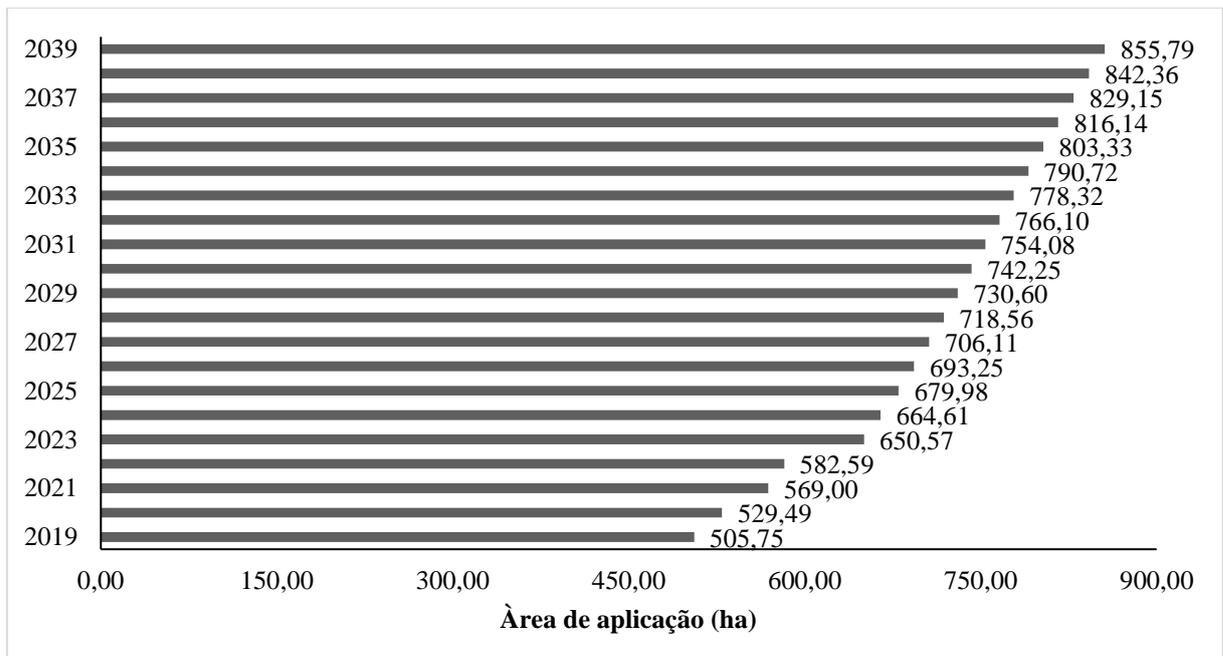
Corrêa et al. (2004) indica que para substratos arenosos o lodo de esgoto mineralizante 10 entre 30% do nitrogênio orgânico em até seis meses, já em solos argilosos, esse percentual varia de 30 a 80%. Diferenças nas taxas de mineralização de lodos é uma consequência do grau de estabilização de cada material, do clima local e do tipo de substrato a que são incorporados. Lodos frescos e irradiado ao sol são muito eficientes em projetos de revegetação, cujo substrato da área seja predominantemente argiloso.

Em locais de clima quente e seco, como no bioma cerrado, a irradiação solar no lodo por uma semana é capaz de reduzir o volume original. A conseqüente concentração de sólidos na massa de lodo torna-o economicamente mais atrativo para ser transportado e utilizado. Para o cálculo da taxa de aplicação utilizou-se a produção de lodo desaguado em  $m^3/\text{ano}$  e dividiu-se pela dose recomendada por Corrêa et al. (2004) de aplicação de lodos de esgoto seco  $10 m^3 ha^{-1}$ .

Portanto, para a ETE X se inicia com uma área de 0,7 ha/ano e no final dos 20 anos com 9,8 ha/ano. No acumulado dos 20 anos são atendidas 142ha de área degradada. Na Figura 9 têm-se a projeção dos 20 anos.

**Figura 9.** Projeção da área de aplicação para disposição de lodo da ETE X.

Enquanto que, para a ETE Y se inicia com uma área de aplicação de 505,7 ha/ano e no final dos 20 anos com 855,8 ha/ano. No acumulado dos 20 anos sua área total será de 15.008,77 ha. Na Figura 10 tem se a projeção anual dos 20 anos.

**Figura 10.** Projeção da área para disposição de lodo da ETE Y.

A respeito das doses recomendadas de aplicação de lodos de esgotos Correa (2007), ressalta que ao serem aplicados a solos e substratos, a insolação e competição com organismos edáficos reduzirão a concentração de patógenos e parasitas presentes em lodos de esgoto. O tempo de sobrevivência desses organismos no solo depende da umidade, pH, textura e porcentagem de matéria orgânica presente no solo, da exposição aos raios solares e dos organismos de solo.

Em substratos arenosos, por exemplo, lodos são capazes de produzir mais biomassa vegetal que a adubação química. Porém, em substratos argilosos, há a necessidade de se aplicarem fertilizantes, seja qual for a fonte de matéria orgânica, pois a produção vegetal máxima dá-se com adubação química. Após a aplicação de matéria orgânica a um substrato, devem-se corrigir a acidez e as concentrações de nutrientes do substrato minerado (CORRÊA, 2007).

O valor de recuperação de cada hectare degradado varia em função da proposta a ser implantada, do nível tecnológico a ser adotado no PRAD, do tipo de material explorado. Contudo alguns custos são iguais em todos eles que são: adubações de cobertura, aceiramento para controle de incêndios, controle de pragas e patógenos, elaboração periódica de relatórios de acompanhamento. O monitoramento é importante, e deve ocorrer um trimestre após o plantio da muda, nessa etapa as mudas perdem parte do vigor e podem apresentar sintomas de deficiência nutricional. Adubações e tratos culturais são essenciais nos primeiros 24 meses de desenvolvimento das mudas no campo.

Sendo assim é feito um cronograma de acompanhamento de locais de recuperação, com as seguintes etapas: nos primeiros 15 a 30 dias após o plantio é feita uma avaliação de sobrevivência das mudas. Logo após, têm-se uma reposição de mudas mortas. Um mês após o plantio e feita a adubação de cobertura e identificação de sinais de ataque de pragas (formigas) e patógenos. Após o primeiro período chuvoso e elaborado uma avaliação de sobrevivência das mudas, identificação de sinais de ataque de pragas (formigas) e patógenos. Para manter o controle das pragas e feito capinas, coroamento das mudas e controle de fogo (aceiramento). Já no início do 2º período chuvoso, e feito outro parecer das mudas e reabertura de covas, com os respectivos cuidados anteriores em relação as pragas nas plantas. Entretanto, no 3º período chuvoso feito última análise nas mudas e reabertura de covas.

#### 4.2.3 Aterro sanitário

Os procedimentos de operação do Aterro Sanitário em área já implantada são realizados em atendimento aos requisitos mínimos estabelecidos na NBR 8419/1992 cujas

rotinas são sistematizadas para que sua eficiência seja maximizada, assegurando seu funcionamento como destinação final sanitária e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos gerados, ao longo de toda a sua vida útil.

A recepção dos resíduos é realizada na guarita do aterro e consiste na operação de inspeção preliminar, durante a qual os veículos, previamente cadastrados e identificados, são vistoriados por fiscal/balanceteiro, treinado e instruído para o desempenho adequado dessa atividade. Esse profissional verifica e registra a origem, a natureza e a classe II -A dos resíduos que chegam ao empreendimento; orienta os motoristas quanto ao local no qual os resíduos devem ser descarregados. Na balança existente na guarita do Aterro Sanitário é realizada a pesagem dos veículos para se ter controle das quantidades diárias e mensais dispostos no local.

A operação de compactação é realizada com movimentos repetidos do equipamento de baixo para cima, procedendo-se, no mínimo, a passadas sucessivas em camadas sobrepostas, até que todo o material disposto em cada camada esteja adequadamente adensado, ou seja, até que se verifique por controle visual que o incremento do número de passadas não ocasiona redução do volume aparente da mesma. No final de cada jornada de trabalho, a camada de resíduos compactados recebe uma camada de terra, espalhada em movimentos de baixo para cima. No dia seguinte, antes do início da disposição dos resíduos, faz-se uma raspagem da camada de solo da face inclinada da frente de operação, para dar continuidade à formação do maciço de resíduos. O solo raspado é armazenado para aproveitamento nas camadas operacionais posteriores, tendo o uso racional de solo proveniente da área de empréstimo ou do material excedente das operações de cortes/escavações executadas na implantação das plataformas.

Os aterros de resíduos têm sido projetados, em termos de segurança estrutural, segundo os princípios da mecânica dos solos, considerando-se cada tipo de resíduo como nova unidade geotécnica. Embora pesquisas venham sendo realizadas sobre o comportamento geotécnico do lodo de ETE (BRINGHENTI, 1998; FEITOSA; OLIVEIRA; FERREIRA, 2010; FERREIRA et al., 2011; AGODA-TANDJAWA et al., 2013), o nível de conhecimento das características e das propriedades geotécnicas desse lodo, para diferentes tipos e níveis de secagem, ainda é limitado (O'KELLY, 2006).

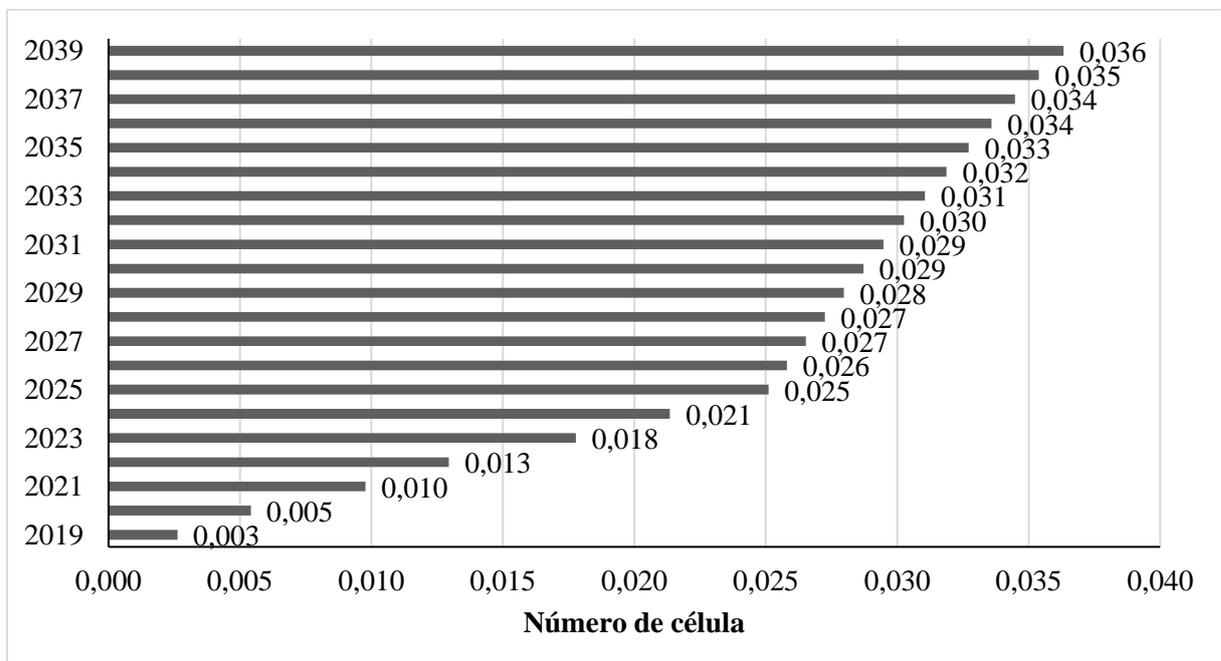
Com a finalidade de reduzir esses efeitos negativos esperados, os órgãos ambientais brasileiros têm fixado, no momento do licenciamento da codisposição de lodos em aterros sanitários, teores mínimos de sólidos totais nos lodos, que variam entre 25 e 30%. Porém, apesar da adoção de critérios para essa prática, o país carece de normas e regulamentos

técnicos específicos sobre o assunto (BRINGHENTI, 2018). A codisposição de lodo em aterros sanitários é prática comum em todo o país, porém não vem acompanhada de estudos geotécnicos aprofundados para indicar a melhor alternativa operacional ou mesmo considerando a codisposição no projeto. A quantidade de lodo recebida baseia-se antes na prática e nos acordos firmados com as ETEs, carecendo-se da padronização de parâmetros de aplicação de lodo em aterros sanitários (BRINGHENTI, 2018).

Sperling (2014) sugere vala de tamanho 8,0 m \* 9,0 m \* 50 m, onde sua capacidade volumétrica total é de 3.600 m<sup>3</sup>, adotando-se uma razão de cobertura de 25 % de terra em relação ao seu volume de lodo, a trincheira armazena aproximadamente 2.700 m<sup>3</sup> de lodo. Determinou-se a relação da produção de lodo desaguado em m<sup>3</sup>/ano (Equação 3) e o volume disponível da célula para estimar quantas células seriam necessárias anualmente.

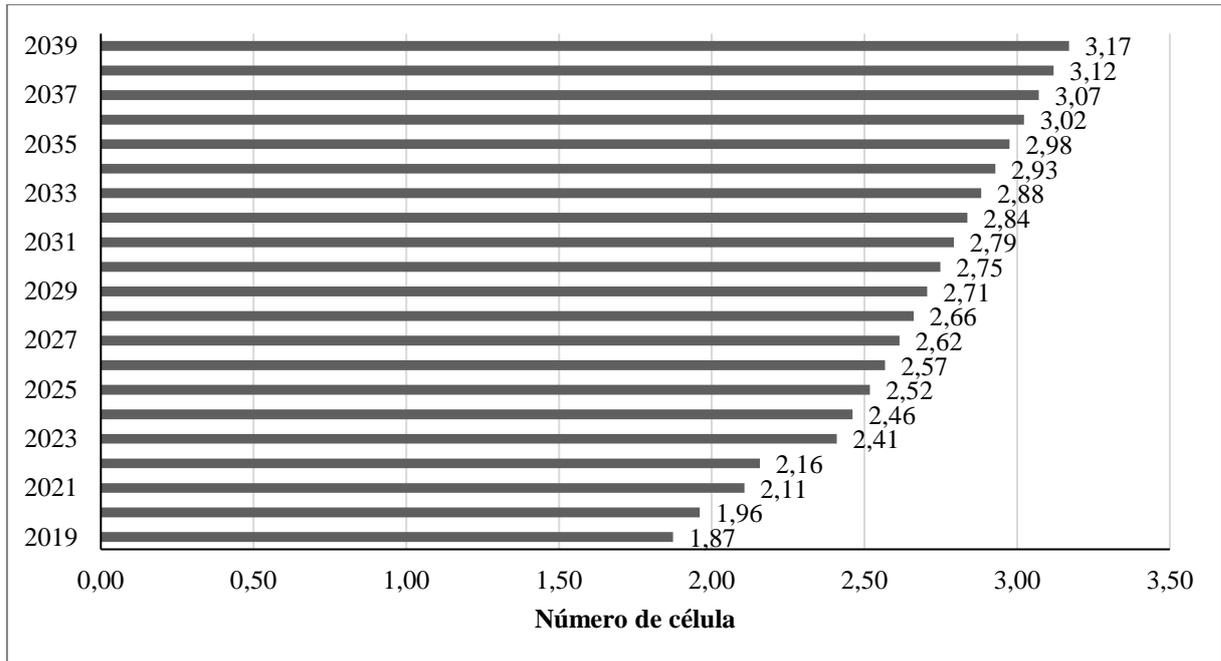
Portanto, no respectivo estudo levou-se em consideração a pré-existência do aterro sanitário para ETE X que durante o período de 20 anos menos de 0,003 do volume da célula seria necessário. Indicando a necessidade de uma disposição combinada de resíduos sólidos ou célula de volume bem inferior (Figura 11).

**Figura 11.** Projeção de número de células do aterro para ETE no período de 20 anos.



Enquanto que o aterro sanitário pré-existente da ETE Y iniciaria com 1,87 células no primeiro ano, 20 anos necessitaria de 3,17 células, e no acumulado total seriam necessárias 55,6 células conforme a Figura 12.

**Figura 12.** Projeção de número de células do aterro para ETE Y no período de 20 anos.



#### 4.2.4 Landfarming

A metodologia do *landfarming* objetiva, através do uso de técnicas agrícolas, tais como a aeração mecânica e a adubação química, aumentar a ação decompositora de microrganismos presentes no solo, para então tratar resíduos que contenham frações sólidas e aquosas *in situ*. A norma NBR ISO 13.894 (Tratamento no Solo – *Landfarming*) estabelece que o projeto, construção, operação e manutenção da unidade devem ser realizados de forma a elevar ao máximo a degradação, a transformação e/ou imobilização de contaminantes da camada reativa do solo. A unidade deve ser inspecionada a cada aplicação do resíduo e após as chuvas, de modo a identificar, registrar e corrigir eventuais irregularidades NBR ISO 13.894. As técnicas operacionais envolvem adição de nutrientes, umidificação, aeração e correção do pH.

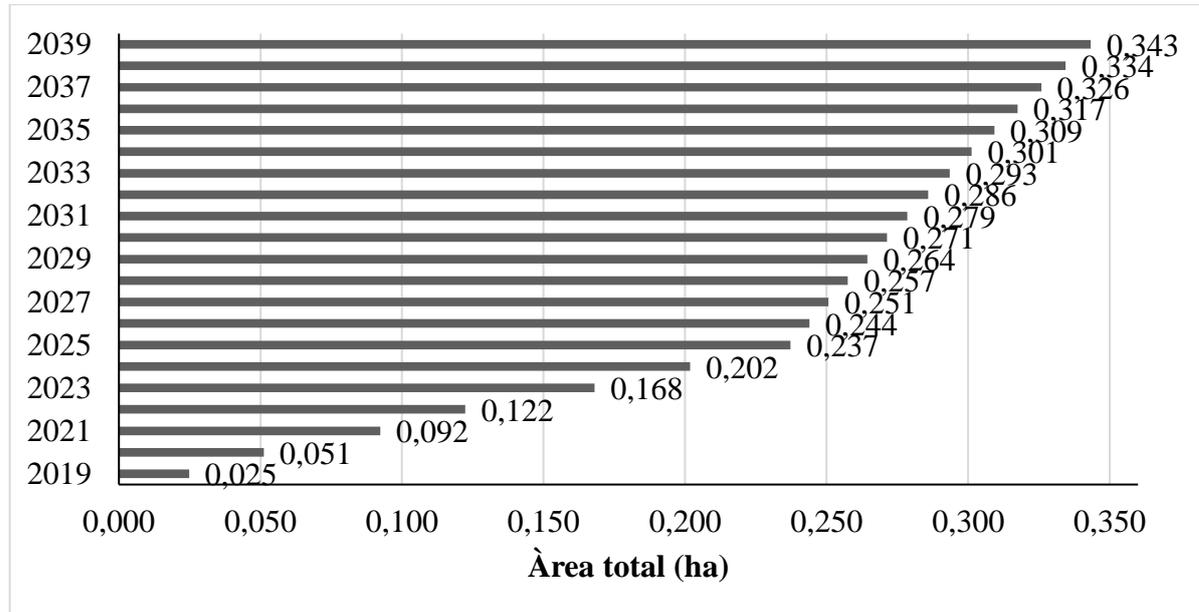
A seleção do local, além de ser fundamental para garantir a eficiência do processo é importante para garantir a segurança e proteção ambiental. Locais com falhas geológicas, alta permeabilidade, aquíferos utilizados para abastecimento de água, nível alto de águas subterrâneas, susceptibilidade a erosão, locais pantanosos, declividade superior a 5%, são desaconselháveis para implantação deste tipo de tratamento. Após o término da aplicação de resíduos, o administrador da instalação deve manter o sistema de drenagem de águas superficiais não contaminadas e de águas superficiais contaminadas, continuar o

monitoramento da zona não saturada, pelo período de um ano, após a última aplicação do resíduo na zona de tratamento, respeitar quaisquer proibições ou condições relativas ao cultivo de produtos agrícolas no local, estabelecer uma cobertura vegetal sobre a parte da instalação que estiver sendo encerrada.

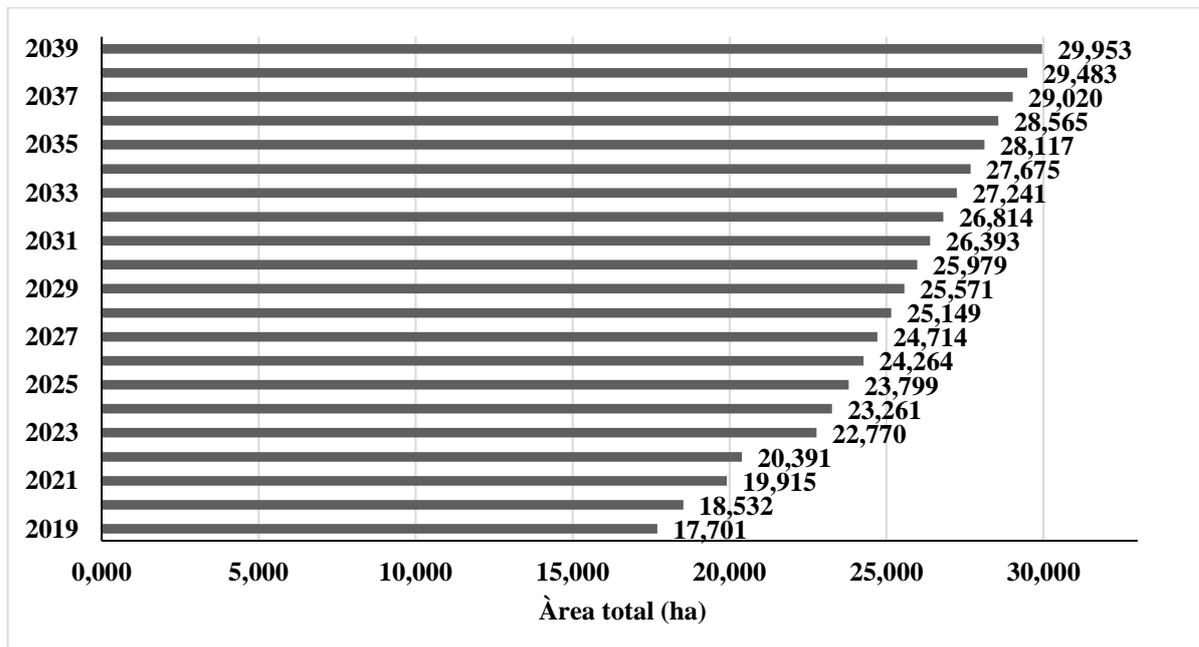
A profundidade máxima da zona de tratamento, medida a partir da superfície do solo, não deve ser maior que 1,50 m, que a critério do órgão estadual de controle ambiental pode ser alterada. A profundidade máxima da camada reativa, medida a partir da superfície original, não deve ser maior que 0,50 m segundo a NBR ISO 13.894. Os *landfarmings*, geralmente, são formados por áreas com cerca de 0,5 - 1,0 ha, denominadas células de biodegradação (JERÔNIMO, 2014). O tempo de funcionamento da célula pode ir até 24 meses, dependendo de uma série de fatores, incluindo a natureza da contaminação, as concentrações de contaminantes, tipos de solo e volume de solo a ser remediado (AUTORIDADE DE PROTEÇÃO AMBIENTAL, 2014).

Para o cálculo da área necessária do *landfarming* presumiu-se uma taxa de aplicação de 300 toneladas de lodo/ha\*ano (base seca), de acordo com Andreoli et al. (2007) e determinou-se a relação da produção de lodo desaguado em m<sup>3</sup>/ano (Equação 3).

A seguir na Figura 13 é apresentada uma estimativa da área total para aplicação do lodo da ETE X, que no início terá um montante de 0,025 ha/ano, no vigésimo ano aproximadamente 0,343 ha/ano, ou seja, seria necessário menos de uma célula de degradação considerando a área mínima de 0,5 ha, pressupondo o uso da área por 20 anos.

**Figura 13.** Prognóstico da área da ETE X ao longo de 20 anos.

A seguir na Figura 14 projeções da área total para aplicação de lodo da ETE Y, que no início terá um montante de 17,7 ha/ano, sendo necessário à disposição a cada 3 semanas em um módulo de *landfarming* de 1,0 ha, e a ampliação de um módulo a cada ano por 20 anos para atender o aumento do volume do lodo em função do aumento populacional. Sendo necessária uma área útil de disposição de aproximadamente 30 hectares em 2039 supondo o uso da mesma área durante 20 anos.

**Figura 14.** Prognóstico da área a dispor o lodo da ETE Y para 20 anos.

## 5. CONCLUSÃO

As principais alternativas de disposição de lodo relatada na literatura são: incineração, aterro sanitário, uso agrícola, combustível, oxidação úmida, recuperação de área degradada, uso industrial, *landfarming*, aterro com bags/exclusivo. Informações sobre as tecnologias de oxidação úmida, combustível e uso industrial são exíguas. O maior volume de informações está associado as alternativas aterro sanitário e incineração. O aterro com bags/exclusivo e *landfarming* mostram uma ascensão de estudos para a sua aplicação. Já o estudo das alternativas de uso agrícola e recuperação de área degradada é antiga, hoje há vários arcabouços legais que permitem a sua aplicação, contudo o uso dessas alternativas ainda é baixo.

Foram estabelecidos 22 critérios para análise multivariada distribuídos em três dimensões: social, tecnológico e ambiental. Na dimensão ambiental foram definidos 8 critérios, onde o de maior peso é o impacto negativo na operação. Já na dimensão social foi definido 7 critérios onde o maior peso foi a não proteção da segurança e da saúde no trabalho. Pôr fim na dimensão tecnológica foram definidos 7 critérios onde o maior peso foi custo de operação e manutenção.

Na análise multivariada para uma condição de porte pequeno as 4 melhores alternativas são elas: *landfarming*, uso agrícola, recuperação de área degradada/aterro sanitário empatadas. Já no porte grande destaca-se uso agrícola, *landfarming*, incineração e recuperação de área degradada.

Considerando o fator limitante área a dispor o lodo, o aterro sanitário e o *landfarming* seriam as melhores alternativas, onde no município X seria necessária apenas 0,5 célula de 2700 m<sup>3</sup> no período de 20 anos e *landfarming* com 0,5 hectares, enquanto que no município Y 55 células e 30 hectares no período de 20 anos.

## REFERÊNCIAS

- ADASA. S.B Governo de Brasília. **Plano distrital de saneamento básico e de gestão integrada de resíduos sólidos**. Relatório síntese prognóstico, programas, projetos e ações. Brasília-DF: 2017.
- AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Plano distrital de saneamento básico e de gestão integrada de resíduos sólidos**: Relatório síntese prognóstico, programas, projetos e ações. Brasília, DF, julho, 2017. 68p.
- AMARAL, Karina Guedes Cubas do *et al.* Análise do custo de ciclo de vida do tratamento e destinação final do lodo e biogás, provenientes de ETE que emprega reatores do tipo UASB. **Revista DAE**, São Paulo, v. 68, n. 226, p. 6-17, 2020.
- AMUDA, O.S.; DENG, A.; ALADE, A.O.; HUNG, Y.T. Conversion of sewage sludge to biosolids. In: WANG, L.K.; SHAMMAS, N.K.; HUNG, Y.T. **Biosolids Engineering and Management**. 07. ed. Humana Press, 2008. p.65-115.
- ANDRADE, C.A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólido da ETE de Barueri**. 1999. 65p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; FERNANDES, F.; SANTOS, H.F. **Tratamento e eliminação de lamas**: Série de tratamento biológico de águas residuais. Reino unido: IWA Publishing, v. 6, 2007.
- ANDREOLI, C.V.; TAMANIN, C.R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E.S.; NEVES, P.S. **Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal**. In: biossólidos - alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: Editora ABES, 398p, 2006.
- ANJOS, R.M.; UBALDO, A.A.B. O desporto como elemento indutor da sustentabilidade na sociedade de risco. In: SOUZA, M.C.S.A.; ARMADA, C.A. **Sustentabilidade, meio ambiente e sociedade: reflexões e perspectivas**. Umuarama: Universidade Paranaense–UNIPAR, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13894**: Tratamento no solo (*landfarming*). Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 10p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 07p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 09p.

AUTORIDADE DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. Estado de NSW e a Autoridade de Proteção Ambiental. **Terra agrícola**. Sydney, 2014. Disponível em: <<https://www.epa.nsw.gov.au/>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

BARROSO, M. M. **Influência do micro e macropropriedades dos lodos de estação de tratamento de água no desaguamento por leito de drenagem**. 2007. 249f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13062007-073455/pt-br.php>>. Acesso em: 18 set. 2019.

BATISTA, L.F. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-168/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 197p. (2015).

BATISTA, Lucilene Ferreira; SOUZA, Marco Antonio Almeida de. Aptidão dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal para condicionamento, utilização e disposição final. **Revista DAE**, São Paulo, v. 68, n. 5, p. 179-195, 2020.

BERTANZA, G.; GALESSI, R.; MENONI, L.; SALVETTI, R.; SLAVIK, E.; ZANABONI, S. Oxidação úmida de lodo de esgoto: experiência em larga escala e modelagem de processos. **Environ Sci. Pollut. Res.** v.22, n.10, p. 7306 – 7316, 2015.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.** v.22, n.6, p.1129-1139, nov/dez, 2017.

BOEIRA, R. Uso de Lodo de Esgoto como Fertilizante Orgânico: Disponibilização de Nitrogênio em Solo Tropical. **Comunicado Técnico**, [s. l.], P. 1 – 3, 2004.

BOINA, Welliton Leandro de Oliveira. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Análise da eficiência de desaguamento de lodos de estação de tratamento de esgotos desaguados em “bag’s de manta geotêxtil**, [s. l.], 2012.

BORGES, F.; SELLIM, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, n. 17, v. 27, P.27-32, 2008.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas**. 1ª ed. Brasília, 88 p, 2017. ISBN: 978-85-8210-050-9.

BRASIL. Governo do Estado do Tocantins. Disponível em: <<https://central3.to.gov.br/arquivo/121934/>>. Acessado em: 20 de outubro de 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Página inicial. MMA em números. **Resíduos sólidos**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/residuos-solidos>>. Acesso em: 18 de fevereiro de 2019.

BRASIL. Resolução 375/2006 do CONAMA. Critérios e procedimentos para uso agrícola de lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário. Brasília-DF: CONAMA, agosto de 2006. BRASIL. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília-DF: 2012.

BRINGHENTI, J.R. Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros. **Aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação**, Eng Sanit Ambient, 2018.

CALDEIRA, M.V.W.; PERONI, L.; GOMES, D.R.; DELARMELINA, W.M.; TRAZZI, P.A. Diferentes proporções de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas de timbó (*Ateleia glazioveana* Baill). **Scientia Forestalis**. v. 40, p. 15-22, 2012.

CHUNG, J.; LEEB, M.; AHNC, J.; BAED, W.; LEEA, Y.; SHIME, H. Efeitos das condições operacionais sobre a formação de lamas de degradação e ácidos orgânicos na oxidação ao ar húmido baixa crítica. **J. Hazard. Mater.** v.162, p. 10 – 16, 2009.

COSTA, B.S.; RIBEIRO, J.C.J. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: direitos e deveres**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, P.53, 2013.

FEITOSA, M.C.A. **Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação de Pós-graduação. Mestrado em Engenharia Civil, 2009. 120f.

FONTES, C. M. A. **Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VAGAS. Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, 2016. Disponível em: <https://portal.fgv.br/.Acesso> em: 15 de outubro de 2019.

GEYER, A. L. B. **Contribuição ao Estudo da Disposição Final e Aproveitamento da Cinza de Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários como Adição ao Concreto**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

HONG, J.; HONG, J.; OTAKI, M.; JOLLIET, O. Avaliação do ciclo de vida ambiental e econômico para processos de tratamento de lodo de esgoto no Japão. **Gerenciamento de Resíduos**. v.29, p. 696 – 703, 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO (São Paulo). Embrapa. **Boletim técnico n 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas-SP: [s. n.], 1997.

JERÔNIMO, C.E. **Dimensionamento de um landfarming para tratamento de borras oleosas utilizando critérios de um reator batelada**. [S. l.]: Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas, 2014. 1273-1285 p. v. 18.

JONES, D.J. UK WaterProjects Online: **Tratamento de Efluentes – Esgotos**. pp. 75 – 77, 2008.

KESSTRA, S.D.; GEISSEN, V.; MOSSE, K.; PIIRANEN, S.; SCUDIERO, E.; LEISTRA, M.; SCHAIK, L. van. Soil as a filter for groundwater quality. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.4, p.507-516, 2012. DOI: 10.1016/j.cosust.2012.10.007.

LARA, A.I.; ANDREOLI, C.V.; PEGORINE, E.S. Avaliação dos impactos ambientais e monitoramento da disposição final do lodo. In: SPERLING, M.V.; FERNANDES, F.; ANDREOLI, C.V. (Ed.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2.ed. 2014. p.423.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: **Lodos de Esgotos – Tratamento e Disposição Final**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 484p.

MALHOTRA, V.M.; MEHTA, P.K. Pozzolanic and cementitious materials. In: **Advances in concrete technology**, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MARANGONI, B; ZALESKI, A; VANZETTO, S.C. Avaliação da incorporação de lodo de ete como substituição ao agregado miúdo na matriz de concreto. **Erechim**, [s. l.], v. 42, ed. 158, p. 21-30, 2018.

MIKI, M.K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A.C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento, mecanizado e secagem térmica do lodo. In: **Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MOCELIN, C. **Pirólise de lodo de esgoto sanitário: produção de adsorventes e óleos combustíveis**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, 2007.

MOURA, A. F. F. *et al.* REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: Uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, [s. l.], v. 06, n. 5, 2020.

PEDROZA, M. M., Vieira, G. E. G., de Sousa, J. F., Pickler, A. de C., Leal, E. R. M., & Milhomen, C. da C. (2013). **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão**. *Revista Liberato*, 11(16), 147–158. Disponível em: <http://www.revista.liberato.com.br/index.php/revista/article/view/160>. Acessado em: 15/12/21.

PEREIRA, A.C.A; GARCIA, M.L. Disposição de lodo de ete de indústria alimentícia no solo: efeitos na água subterrânea. **Geociências**, São Paulo, v. 36, ed. 2, p. 275 – 283, 2017.

PEREIRA, Ana Carolina Amaral. **Efeitos da disposição de lodo de ETE de indústria alimentícia no solo: estudo de caso**. 2015. 75 f. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/134033>>. Acessado em: 15/12/21.

SANTOS, A. D., JOHN, V. M., e VIEIRA COELHO, A. C. **reciclagem do lodo de esgoto - uma alternativa de gestão**. In Congresso Latino Americano de Construção Sustentável / 10 ENTAC, São Paulo, 2004. clCS04/ENTAC04.PORTO ALEGRE: ANTAC, 2004.

SANTOS, P.J.A.; RAMALHO, A.M.C. **Impactos ambientais sobre a paisagem e concepções da população decorrentes da efetivação do programa caminhos da Paraíba no município Coxixola.** (Resumo). I Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido – CONIDIS. Paraíba, 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2019.** [S. l.], 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2019>. Acesso em: 29 jun. 2021.

SNATURAL AMBIENTE. **Sacos para Desidratação de Lodo: Remoção de Sólidos.** [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/wp-content/uploads/2017/05/Geobag-Lodo-Filtracao-Desidracao.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2021.

SOUTO, L.S.; SILVA, L.M.; LOBO, T.F.; FERNANDES, D.M.; LACERDA, N.B. **Níveis e formas de aplicação de lodo de esgoto na nutrição e crescimento inicial da mamoneira.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.9, p.274-277, 2005.

SOUZA, N.A. de. **Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas: um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG.** 2009. 135p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SPERLING, M.V; FERNANDES, ANDREOLI. **Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final,** editora UFMG, 2 ed, p.419-421,2014.

TRAZZI, P.A. **Substratos renováveis na produção de mudas de Tectona grandis Linn F.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 74, 2011.

**USO do logo de esgoto na agricultura promove sustentabilidade ambiental.** [S. l.], 25 ago. 2018. Disponível em: < <https://www.alertaparana.com.br/noticia/1811/uso-do-logo-de-esgoto-na-agricultura-promove-sustentabilidade-ambiental> >. Acesso em: 23 fev. 2021.

VAN HAANDEL, A. C.; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In ANDREOLI, C. V. (Coord). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento; Biossólidos.** Rio de Janeiro-RJ: ABES, 2006; 417p.

VANZETTO, A. S. (2012). **Análise das Alternativas Tecnológicas de Deságüamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM 139/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185p.

VASQUES, A. R. **Caracterização de adsorventes obtidos por combustão e pirólise de lodo residual e aplicação no tratamento de efluentes têxteis.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2012.

VIEIRA, G.E.G.; PEDROZA, M.M.; SOUZA, J.F.; PEDROZA, C.M. **O processo de pirolise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético do lodo de esgoto – uma revisão.** Revista Liberato. v.12, n.17, p. 01-106, 2011.

Von Sperling, M. (2014). “Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos”, Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 1 / 4ª edição, UFMG Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte - MG, Brasil, 470p.

**APÊNDICE**

**QUADRO 1.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de incineração.

Alternativa			Incineração			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h) Grande porte	Total Porte Grande
			<0,0440925		15,5	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	1	0,04	1	0,04
	Impactos negativos na implantação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Impactos negativos na operação	0,08	5	0,4	5	0,4
	Potencial poluidor do lodo	0,04	3	0,12	3	0,12
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	1	0,02	1	0,02
	Produção do Odor	0,04	1	0,04	1	0,04
	Supressão vegetal	0,04	3	0,12	3	0,12
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	3	0,15	3	0,15
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	1	0,05	1	0,05
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	5	0,35	5	0,35
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	5	0,4	5	0,4
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	5	0,1	5	0,1
	Complexidade de operação	0,03	5	0,15	5	0,15
	Não Confiabilidade do processo	0,03	1	0,03	1	0,03
	Custo de operação e manutenção	0,12	5	0,6	5	0,6
	Demanda por área	0,03	3	0,09	3	0,09
	Demanda por energia elétrica	0,03	5	0,15	5	0,15
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	1	0,05	1	0,05
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>3,22</b>		<b>3,22</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

**QUADRO 2.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de oxidação úmida.

Alternativa		Oxidação úmida				
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h) Grande porte	Total Porte Grande
<b>Ambiental</b>	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	1	0,04	1	0,04
	Impactos negativos na implantação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Impactos negativos na operação	0,08	5	0,4	5	0,4
	Potencial poluidor do lodo	0,04	3	0,12	3	0,12
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	1	0,02	1	0,02
	Produção do Odor	0,04	1	0,04	1	0,04
	Supressão vegetal	0,04	3	0,12	3	0,12
<b>Social</b>	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	3	0,15	3	0,15
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	1	0,05	1	0,05
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	5	0,35	5	0,35
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	5	0,4	5	0,4
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
<b>Técnica</b>	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	5	0,1	5	0,1
	Complexidade de operação	0,03	5	0,15	5	0,15
	Não Confiabilidade do processo	0,03	5	0,15	5	0,15
	Custo de operação e manutenção	0,12	5	0,6	5	0,6
	Demanda por área	0,03	3	0,09	3	0,09
	Demanda por energia elétrica	0,03	5	0,15	5	0,15
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	1	0,05	1	0,05
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>3,34</b>		<b>3,34</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

**QUADRO 3.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de uso agrícola.

Alternativa		Uso agrícola				
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h) Grande porte	Total Porte Grande
			6		18	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	5	0,2	5	0,2
	Geração de rejeitos	0,04	3	0,12	3	0,12
	Impactos negativos na implantação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Impactos negativos na operação	0,08	3	0,24	3	0,24
	Potencial poluidor do lodo	0,04	3	0,12	3	0,12
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	3	0,06	3	0,06
	Produção do Odor	0,04	5	0,2	5	0,2
	Supressão vegetal	0,04	1	0,04	1	0,04
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	5	0,25	5	0,25
	Alteração na paisagem	0,05	1	0,05	1	0,05
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	3	0,15	3	0,15
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	1	0,07	1	0,07
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	1	0,08	1	0,08
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	1	0,02	1	0,02
	Complexidade de operação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Não Confiabilidade do processo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Custo de operação e manutenção	0,12	1	0,12	1	0,12
	Demanda por área	0,03	1	0,03	1	0,03
	Demanda por energia elétrica	0,03	1	0,03	1	0,03
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	5	0,15	5	0,15
	Susceptibilidade ao clima	0,05	5	0,25	5	0,25
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>2,42</b>		<b>2,42</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

QUADRO 4. Quantificação teórica de lodo da alternativa de combustível.

Alternativa			Combustível			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (kg/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (kg/h) Grande porte	Total Porte Grande
			200		4000	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	1	0,04	1	0,04
	Impactos negativos na implantação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Impactos negativos na operação	0,08	5	0,4	5	0,4
	Potencial poluidor do lodo	0,04	3	0,12	3	0,12
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	1	0,02	1	0,02
	Produção do Odor	0,04	1	0,04	1	0,04
	Supressão vegetal	0,04	3	0,12	3	0,12
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	3	0,15	3	0,15
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	1	0,05	1	0,05
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	5	0,35	5	0,35
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	5	0,4	5	0,4
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	5	0,1	5	0,1
	Complexidade de operação	0,03	5	0,15	5	0,15
	Não Confiabilidade do processo	0,03	5	0,15	5	0,15
	Custo de operação e manutenção	0,12	5	0,6	5	0,6
	Demanda por área	0,03	3	0,09	3	0,09
	Demanda por energia elétrica	0,03	5	0,15	5	0,15
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	1	0,05	1	0,05
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>3,34</b>		<b>3,34</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

**QUADRO 5.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de aterro sanitário.

Alternativa			Aterro sanitário			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h) Grande porte	Total Porte Grande
			100		2000	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	5	0,2	5	0,2
	Impactos negativos na implantação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Impactos negativos na operação	0,08	1	0,08	1	0,08
	Potencial poluidor do lodo	0,04	5	0,2	5	0,2
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	5	0,1	5	0,1
	Produção do Odor	0,04	5	0,2	5	0,2
	Supressão vegetal	0,04	1	0,04	1	0,04
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	1	0,05	1	0,05
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	3	0,15	3	0,15
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	5	0,35	5	0,35
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	3	0,24	3	0,24
	Reclamação da vizinhança	0,03	5	0,15	5	0,15
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	1	0,02	1	0,02
	Complexidade de operação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Não Confiabilidade do processo	0,03	1	0,03	1	0,03
	Custo de operação e manutenção	0,12	3	0,36	3	0,36
	Demanda por área	0,03	1	0,03	1	0,03
	Demanda por energia elétrica	0,03	1	0,03	1	0,03
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	5	0,25	5	0,25
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>2,72</b>		<b>2,72</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

**QUADRO 6.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de recuperação de área degradada.

Alternativa			Recuperação de área degradada			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h / ano) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h / ano) Grande porte	Total Porte Grande
			15 a 592 obs: Base úmida		20 a 700 obs: Base úmida	
<b>Ambiental</b>	Contaminação do lençol freático	0,04	5	0,2	5	0,2
	Geração de rejeitos	0,04	3	0,12	3	0,12
	Impactos negativos na implantação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Impactos negativos na operação	0,08	3	0,24	3	0,24
	Potencial poluidor do lodo	0,04	5	0,2	5	0,2
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	5	0,1	5	0,1
	Produção do Odor	0,04	5	0,2	5	0,2
	Supressão vegetal	0,04	1	0,04	1	0,04
<b>Social</b>	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	3	0,15	3	0,15
	Alteração na paisagem	0,05	1	0,05	1	0,05
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	5	0,25	5	0,25
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	1	0,07	1	0,07
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	1	0,08	1	0,08
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
<b>Técnica</b>	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	1	0,02	1	0,02
	Complexidade de operação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Não Confiabilidade do processo	0,03	1	0,03	1	0,03
	Custo de operação e manutenção	0,12	1	0,12	1	0,12
	Demanda por área	0,03	1	0,03	1	0,03
	Demanda por energia elétrica	0,03	1	0,03	1	0,03
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	5	0,15	5	0,15
	Susceptibilidade ao clima	0,05	5	0,25	5	0,25
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>2,48</b>		<b>2,48</b>

<b>Legenda</b>	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

QUADRO 7. Quantificação teórica de lodo da alternativa de uso industrial.

Alternativa			Uso Industrial			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (kg/ bloco) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (kg/ bloco) Grande porte	Total Porte Grande
			1000		> 1000	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	1	0,04	1	0,04
	Impactos negativos na implantação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Impactos negativos na operação	0,08	5	0,4	5	0,4
	Potencial poluidor do lodo	0,04	3	0,12	3	0,12
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	1	0,02	1	0,02
	Produção do Odor	0,04	1	0,04	1	0,04
	Supressão vegetal	0,04	3	0,12	3	0,12
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	3	0,15	3	0,15
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	1	0,05	1	0,05
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	5	0,35	5	0,35
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	5	0,4	5	0,4
	Reclamação da vizinhança	0,03	3	0,09	3	0,09
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	3	0,06	3	0,06
	Complexidade de operação	0,03	5	0,15	5	0,15
	Não Confiabilidade do processo	0,03	5	0,15	5	0,15
	Custo de operação e manutenção	0,12	5	0,6	5	0,6
	Demanda por área	0,03	3	0,09	3	0,09
	Demanda por energia elétrica	0,03	5	0,15	5	0,15
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	1	0,05	1	0,05
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>3,3</b>		<b>3,3</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

QUADRO 8. Quantificação teórica de lodo da alternativa de *Landfarming*.

Alternativa		Landfarming				
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (ton/h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (ton/h) Grande porte	Total Porte Grande
			300		600	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	3	0,12	3	0,12
	Impactos negativos na implantação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Impactos negativos na operação	0,08	3	0,24	3	0,24
	Potencial poluidor do lodo	0,04	5	0,2	5	0,2
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	5	0,1	5	0,1
	Produção do Odor	0,04	5	0,2	5	0,2
	Supressão vegetal	0,04	3	0,12	3	0,12
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	5	0,25	5	0,25
	Alteração na paisagem	0,05	1	0,05	1	0,05
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	3	0,15	3	0,15
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	3	0,21	3	0,21
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	3	0,24	3	0,24
	Reclamação da vizinhança	0,03	5	0,15	5	0,15
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	3	0,06	3	0,06
	Complexidade de operação	0,03	1	0,03	1	0,03
	Não Confiabilidade do processo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Custo de operação e manutenção	0,12	3	0,36	3	0,36
	Demanda por área	0,03	3	0,09	3	0,09
	Demanda por energia elétrica	0,03	1	0,03	1	0,03
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Susceptibilidade ao clima	0,05	5	0,25	5	0,25
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>3,16</b>		<b>3,16</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5

**QUADRO 9.** Quantificação teórica de lodo da alternativa de aterro exclusivo com *bags*.

Alternativa			Aterro com bags / Exclusivo			
Dimensão	Critério	Pesos	Volume (m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> / h) Pequeno porte	Total Porte pequeno	Volume (m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> / h) Grande porte	Total Porte Grande
			> 25		>40	
Ambiental	Contaminação do lençol freático	0,04	1	0,04	1	0,04
	Geração de rejeitos	0,04	3	0,12	3	0,12
	Impactos negativos na implantação	0,03	5	0,15	5	0,15
	Impactos negativos na operação	0,08	3	0,24	3	0,24
	Potencial poluidor do lodo	0,04	5	0,2	5	0,2
	Produção de Ruído e Vibração	0,02	1	0,02	1	0,02
	Produção do Odor	0,04	5	0,2	5	0,2
	Supressão vegetal	0,04	5	0,2	5	0,2
Social	Não Aceitabilidade do Processo de disposição do lodo	0,05	1	0,05	1	0,05
	Alteração na paisagem	0,05	5	0,25	5	0,25
	Não Eliminação de organismos patogênicos	0,05	3	0,15	3	0,15
	Emanação de gases e outros subprodutos	0,07	3	0,21	3	0,21
	Não a Proteção a segurança e a saúde no trabalho	0,08	1	0,08	1	0,08
	Reclamação da vizinhança	0,03	1	0,03	1	0,03
Técnica	Complexibilidade de construção e instalação	0,02	3	0,06	3	0,06
	Complexidade de operação	0,03	3	0,09	3	0,09
	Não Confiabilidade do processo	0,03	3	0,09	3	0,09
	Custo de operação e manutenção	0,12	1	0,12	1	0,12
	Demanda por área	0,03	5	0,15	5	0,15
	Demanda por energia elétrica	0,03	3	0,09	3	0,09
	Dificuldade de transporte do lodo	0,03	1	0,03	1	0,03
	Susceptibilidade ao clima	0,05	1	0,05	1	0,05
<b>Total</b>		<b>1</b>		<b>2,62</b>		<b>2,62</b>

Legenda	
Pequeno	1
Médio	3
Alto	5