



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Ana Julia Mendonça Gübel

**Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo
proveniente das estações de tratamento de águas residuais**

Florianópolis

2024

Ana Julia Mendonça Gübel

**Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo
proveniente das estações de tratamento de águas residuais**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Prof.(a) Maria Elisa Magri.

Florianópolis

2024

Gubel, Ana Julia Mendonça

Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo proveniente das estações de tratamento de águas residuais / Ana Julia Mendonça Gubel ; orientadora, Maria Elisa Magri, 2024.

82 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Biossólidos. 3. Lodo de esgoto. 4. Economia Circular. 5. Reciclagem agrícola. I. Magri, Maria Elisa. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Ana Julia Mendonça Gubel

**Aplicação de biossólidos na agricultura como alternativa para a gestão do lodo
proveniente das estações de tratamento de águas residuais**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 02 de julho de 2024.

Prof^o Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof.(a) Maria Elisa Magri, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho aos amores que me deram a vida: Patricia e Guilherme. E ao amor que a vida me deu: Gabriela.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, pela saúde, pelo sustento e pelas oportunidades que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, a quem tudo devo, agradeço por absolutamente todas as oportunidades que me proporcionaram. A maturidade me permitiu sentir ainda mais orgulho de vocês pelas pessoas de valores que vocês são: trabalhadores, honestos, íntegros, bondosos. Obrigada, meus amores, por terem sempre honrado tanto o papel de pai e mãe. Não tem nada nessa vida que pague tudo que vocês sempre foram e são pra mim. Obrigada por sonharem comigo os meus sonhos. Agradeço pela dedicação incansável para que eu pudesse chegar até aqui. Sem vocês nada teria sido possível. Vocês me ensinaram a voar, mas sempre serão meu lugar seguro para pousar.

Mãe, sempre tão amorosa e protetora...sempre nos colocou à frente de tudo. Você é a pessoa que eu mais admiro nessa vida! Obrigada, mãe, por absolutamente tudo! Por toda a ajuda, por ter sido sempre o meu suporte emocional, por sempre estar aqui por mim, pelo nosso laço forte, amizade, pela vida. Você é a primeira pessoa que eu penso em ligar. Minha amiga. Obrigada mãe por ser você!

Pai, você esteve comigo desde os meus primeiros passos dessa jornada. Acompanhou-me no vestibular e acreditou mais em mim do que eu mesma. Esteve presente na matrícula, tão orgulhoso que parecia uma vitória sua. Mas é. Essa vitória é nossa. Obrigada, pai, por ser o meu lugar seguro, sempre tão presente, tão cuidadoso e dedicado.

Gabi, minha irmã, minha melhor amiga, escolher percorrer essa jornada distante de casa me trouxe o preço mais caro, que é viver longe de você. Logo nós que sempre vivemos grudadas. Mas essa mesma distância me fez entender ainda mais o amor...ele se fortalece. Você é a minha maior certeza. Sempre percebi o jeito que você me admirava e se orgulhava de mim, e mesmo que você não saiba, isso sempre teve um peso tão grande pra mim. Por isso, hoje quero que você saiba que quem te admira e se orgulha de você, sou eu! Você é o amor da minha vida, minha força, meu combustível! Obrigada por tudo que vivemos juntas, pela nossa amizade, e pelo nosso laço tão forte que me fortaleceu tanto até aqui. Obrigada!

Aos meus avós, Cimara e Dácio, a base sólida da minha família, que sempre foram tão presentes na minha vida, donos dos corações mais puros, nunca mediram esforços por nós, minha eterna gratidão. Me ensinaram que o bem mais precioso é a família e que tem um papel muito importante nas pessoas maravilhosas que são meu pai e minha mãe. Vó e Vô, vocês são os meus amores, e eu tenho muito orgulho de ser a neta de vocês. Obrigada por vibrarem

pelas minhas conquistas como se fosse de vocês! Obrigada por todo o amor, todo o incentivo, o carinho, e dedicação!

À vocês, minha amada família, que mesmo distante, foram a minha força, todo meu amor, respeito e gratidão! Agradeço pelos valores, por todo o carinho, a dedicação, incentivo, oportunidades, cada ligação que me fortaleceu, por serem o meu lar, meu lugar seguro para onde eu sempre posso voltar. Estar longe de vocês foi com certeza o maior preço que eu paguei por essa graduação.

Ao Pedro, meu namorado, que se fez meu lar aqui em Florianópolis nestes últimos anos, agradeço por todo o apoio, por todo o amor e parceria. Você com certeza trouxe muito mais sentido pra essa caminhada. Você é o meu ombro amigo, conselheiro, meus finais de semana, acalento pras tensões. Meu amigo acima de tudo, obrigada por todo o suporte emocional e por me ajudar tanto. Obrigada por me ouvir e me acalmar. Só eu sei o quão importante foi saber que eu te tenho aqui. Obrigada, meu amor, por tudo até aqui e que tenhamos um futuro cheio de realizações juntos!

Aos meus maiores presentes da graduação: Camila, quem eu sempre admirei e que foi a minha primeira dupla na universidade; Gabrieli, com certeza minha maior companheira nessa jornada e que foi, muitas vezes, o meu conforto; Gilles, com quem eu podia sempre contar, pessoa mais autêntica e de alto astral, que fazia qualquer dia valer a pena; Luiz, a primeira pessoa que conversei no primeiro dia de aula, meu amigo tão dedicado; e Nicolli, que mesmo não seguindo mais o mesmo caminho, estará sempre no meu coração. À vocês meus amigos, meu muito obrigada por toda a parceria nos projetos, todos os cafés tomados, tensões divididas, risadas! Com certeza, com vocês, essa jornada ficou mais leve e prazerosa de ser vivida. Que esse tenha sido o começo da longa estrada que vamos percorrer juntos.

À todos os professores que fazem parte do corpo docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, agradeço por todas as aulas e por todos os ensinamentos compartilhados. Em especial ao Professor Drº Pablo Sezerino, que, numa das suas aulas da disciplina de Sistemas de Esgoto Sanitário, despertou minha curiosidade e interesse pelo tema deste trabalho e a Professora Drª Maria Elisa Magri, minha orientadora, pela oportunidade.

A todos aqui não citados, que mesmo que indiretamente fizeram parte dessa jornada, minha eterna gratidão.

Por fim, agradeço a mim mesma pela dedicação e seriedade com que encarei a graduação. Em especial à menina de 18 anos que deixou Suzano para viver um sonho em

Florianópolis: tudo valeu a pena. Agradeço pelo propósito e pela coragem. Afinal, como disse Guimarães Rosa: a vida [...] o que ela quer da gente é coragem.

Saio da Universidade Federal de Santa Catarina profundamente honrada pela oportunidade de um ensino gratuito e de alta qualidade, com professores extremamente competentes. Concluo esta etapa da minha vida com muito orgulho pela maturidade adquirida, pelas experiências vividas, por cada pessoa que cruzou meu caminho, por todos os ensinamentos e por tudo o que esta jornada refletiu na minha vida pessoal.

RESUMO

A exploração dos recursos naturais e o consumo global de recursos ecológicos destacam a urgência de adotar práticas mais sustentáveis. Os problemas ambientais e socioeconômicos são agravados pela gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos, incluindo o lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto. Neste contexto, a transição para uma economia circular, onde resíduos são reintegrados como matéria-prima, emerge como uma solução crucial. Paralelamente, o Brasil, um país com destaque agrícola, figura entre os maiores consumidores de fertilizantes do mundo. Assim, uma das possibilidades para o reaproveitamento do lodo é sua aplicação na agricultura como fertilizante ou condicionador de solo, devido às suas características que podem melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. No entanto, o lodo também apresenta características indesejáveis que afetam sua qualidade sanitária, exigindo processos adequados de tratamento. Embora seja considerada uma alternativa promissora para a gestão de lodos, sua prática no Brasil ainda é pouco disseminada em comparação com países da Europa, América do Norte e Austrália. Apenas 14% de todo o lodo produzido no Brasil é destinado à aplicação na agricultura. Para compreender os desafios específicos do contexto brasileiro, realizou-se uma análise comparativa da legislação nacional com a de países como Irlanda, Estados Unidos e Austrália, cujos resultados são significativos. Essa análise revela estruturas similares, porém com diferenças na classificação, critérios específicos e parâmetros químicos e microbiológicos regulados. Diante das discussões e questionamentos levantados, recomenda-se estudos mais aprofundados sobre os componentes químicos para assegurar a segurança ambiental e a saúde pública. Além disso, foi investigada a qualidade microbiológica dos biossólidos produzidos pelos tratamentos indicados na legislação brasileira, com base em estudos de caso e a partir dos dados obtidos, realizou-se uma análise dos critérios operacionais exigidos na resolução CONAMA 498/2020 que permite concluir que, embora alguns estudos tenham obtido biossólidos com qualidades microbiológicas aceitáveis perante a legislação, os tratamentos podem sofrer a influência de fatores externos. Portanto, destaca-se a importância do monitoramento contínuo dos produtos finais obtidos por diferentes métodos de tratamento de lodo como medida essencial para garantir a segurança. Conclui-se então que a legislação vigente no Brasil apresenta-se flexível e bem estruturada quando comparada com países que adotam a aplicação de biossólidos na agricultura em larga escala. Com o cumprimento adequado da legislação e a participação ativa dos órgãos reguladores no monitoramento da qualidade dos biossólidos, é possível assegurar a proteção à saúde pública e ao meio ambiente. Diante da urgência em mudar hábitos para promover o desenvolvimento sustentável, o cenário brasileiro para essa prática é promissor e positivo.

Palavras-chave: Lodo; estação de esgoto; biossólidos; economia circular; agricultura; reciclagem agrícola; estabilização; higienização.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lodo bruto de lagoa facultativa.....	4
Figura 2- Biossólido peletizado.....	12
Figura 3- Parâmetro produção total de lodo na União Européia.....	19
Figura 4- Produção de lodo nos países da União Europeia- Parte 1.....	19
Figura 5- Produção de lodo nos países da União Europeia- Parte 2.....	20
Figura 6- Parâmetro disposição de lodo na agricultura na União Européia.....	20
Figura 7- Disposição de lodo na agricultura nos países da União Europeia.....	21
Figura 8 - Disposição do biossólido nos Estados Unidos.....	22
Figura 9- Destinação do lodo na Austrália.....	22
Figura 10 - Concentração de patógenos nas amostras utilizadas no experimento do Rio de Janeiro.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Subproduto gerado nas etapas da ETE.....	5
Quadro 2 - Características dos tipos de lodo.....	5
Quadro 3 - Concentração de agentes patogênicos presentes em lodo de esgoto.....	9
Quadro 4 - Objetivos e métodos das etapas de tratamento do lodo.....	11
Quadro 5- Produção de lodo na Europa, Ásia Oriental e América do Norte.....	16
Quadro 6 - Utilização de biossólidos na agricultura em diversos países.....	23
Quadro 7- Processos de tratamento e requisitos exigidos e considerados.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas do lodo de esgoto.	8
Tabela 2 - Concentração máxima de contaminantes - Nova Gales do Sul.	31
Tabela 3 - Concentração máxima de contaminantes - Queensland.	32
Tabela 4 - Concentração máxima de contaminantes - Austrália do Sul.	32
Tabela 5 - Concentração máxima de contaminantes (mg/kg) - Vitória.	33
Tabela 6 - Concentração máxima de contaminantes - Tasmânia.	33
Tabela 7 - Concentração máxima de contaminantes - Austrália Ocidental.	34
Tabela 8 - Concentração máxima de contaminantes - Território do Norte.	34
Tabela 9 - Comparativo dos parâmetros químicos regulados pelas legislações da Irlanda, Austrália, EUA e Brasil.	36
Tabela 10 - Padrões microbiológicos de acordo com as legislações da Austrália.	41
Tabela 11 - Parâmetros microbiológicos máximos permitidos pelas legislações do Brasil, Irlanda, Austrália e EUA.	42
Tabela 12 - Eficiência dos processos de redução adicional de patógenos.	49
Tabela 13 - Eficiência dos processos de redução significativa de patógenos.	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS	2
3.1.1 Definição de lodos de esgotos sanitários	3
3.1.2 Característica do lodo	4
3.1.2.1 <i>Composição do lodo e características químicas</i>	6
3.1.2.2 <i>Características físicas</i>	7
3.1.2.3 <i>Características microbiológicas</i>	8
3.1.3 Processamento do lodo	10
3.2 BIOSSÓLIDOS	12
3.2.1 Propriedades	13
3.2.1.1 <i>Propriedades químicas</i>	13
3.2.1.2 <i>Propriedades físicas</i>	14
3.2.1.3 <i>Propriedades microbiológicas</i>	15
3.2.2 Problemática da contaminação	15
3.2.3 Perspectiva internacional da aplicação de biossólidos	16
4 METODOLOGIA	18
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA	18
4.1.1 Critério de escolha dos países	18
4.1.2 Legislações	24
4.2 QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BIOSSÓLIDOS	25
4.2.1 Tratamentos de lodo	25
4.2.2 Levantamento de dados	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 ANÁLISE COMPARATIVA	27
5.1.1 Legislações	27
5.1.1.1 <i>Brasil</i>	27
5.1.1.2 <i>Irlanda</i>	28
5.1.1.3 <i>Austrália</i>	28
5.1.1.4 <i>Estados Unidos</i>	29
5.1.2 Classificação dos biossólidos	29
5.1.3 Limites de concentrações de poluentes regulados	31
5.1.3 Parâmetros microbiológicos regulado	40
5.1.4 Usos e restrições	46
5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BIOSSÓLIDOS E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS CRITÉRIOS OPERACIONAIS	48
6 CONCLUSÃO	60

1. INTRODUÇÃO

A exploração insustentável dos recursos naturais, evidenciada pela utilização desproporcional de recursos ecológicos globalmente - equivalente a quase dois planetas Terra, destaca a urgência de mudança de hábitos e adoção de práticas mais sustentáveis (World Wide Fund for Nature [WWF], 2022). Leitão (2015) argumenta que essa escassez representa uma ameaça para a economia global, construída ao longo dos anos com um modelo linear de negócios, envolvendo extração, transformação, produção, consumo e eliminação, com reciclagem ou incineração em certos casos. Esse modelo também contribui para problemas ambientais como a geração exacerbada de resíduos, que no cenário brasileiro, é agravada pelo rápido crescimento das cidades nas últimas décadas (Cabreira *et al.*, 2017).

Esses resíduos são motivo de crescente preocupação devido à poluição e aos impactos socioambientais causados pela disposição inadequada. Logo, tendo em vista este panorama, adotar um modelo de economia circular, como proposto por Leitão (2015), baseado em um ciclo contínuo de uso onde resíduos se tornam matéria-prima para outros processos, emerge como uma solução potencial.

Um exemplo prático desse conceito é a gestão do resíduo resultante das atividades de saneamento, que se faz essencial nos centros urbanos. O lodo, resultante do tratamento de esgoto doméstico, é um resíduo sólido cuja destinação é uma preocupação mundial e representa um grande desafio, ressaltando a necessidade e urgência em aprimorar o seu gerenciamento (Cabreira *et al.*, 2017; Andreoli e Pinto, 2001).

Paralelamente a isso, o Brasil representa uma potência do setor agrícola, ocupando, em 2018, o quarto lugar dentre os maiores consumidores de fertilizantes do mundo, correspondente a cerca de 8% do consumo global, dentre os quais mais de 80% são de origem estrangeira, conforme Brasil (2020). Através desta perspectiva, os lodos de tratamento de esgoto, ricos em nutrientes como carbono orgânico, nitrogênio e fósforo, podem ser transformados em valiosos insumos agrícolas (Caminada, 2023; Tsutiya *et al.*, 2002) contribuindo assim para a agricultura nacional.

Portanto, o produto direto das atividades urbanas ligadas ao saneamento, que tem sua destinação final tradicionalmente realizada em aterros (Rigo *et al.*, 2014), tornar-se-á matéria prima de um produto de grande importância econômica para o Brasil, podendo ser aplicado como condicionador de solo ou fertilizante. Esta é uma alternativa para tornar a destinação final mais ambientalmente adequada, conforme definida pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos, inclui “a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético [...] de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança

e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010), contribuirá com a reciclagem de nutrientes.

Embora seja considerada como uma promissora alternativa para a gestão de lodos, sua prática no Brasil ainda é pouco disseminada. De todo o lodo produzido no país, apenas 14% têm como destinação final a aplicação na agricultura (Sanepar, 2022). Neste contexto, o presente trabalho possui como objetivo investigar o uso de lodos resultantes do tratamento de esgoto doméstico na agricultura, a exemplos dos biossólidos, como uma alternativa ecologicamente sustentável, visando compreender os desafios do cenário brasileiro.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o uso de biossólidos na agricultura, como alternativa sustentável para a gestão de lodos oriundos de estações de tratamento de águas residuais do Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conduzir uma análise comparativa das legislações e normas vigentes que regulamentam a aplicação de biossólido na agricultura, entre os países com alta adoção da prática e o Brasil;
- Investigar a qualidade microbiológica associada aos biossólidos originários dos processos de tratamento expostos na legislação brasileira, a partir de estudos de caso;
- Realizar uma análise da efetividade dos critérios operacionais exigidos na legislação brasileira para a execução dos tratamentos do lodo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS

A transformação da água em esgoto ocorre através de sua incorporação com diversas impurezas, como resíduos, material orgânico e nutrientes, e que precisam ser removidas visando adequação com os padrões de qualidade de águas estabelecidos pela legislação ambiental, com a finalidade de retorno do recurso natural, a água, ao meio ambiente.

Os esgotos de uma cidade e que contribuem à estação de tratamento de esgotos podem ser basicamente originados de três fontes distintas: os esgotos domésticos, que incluem residências, instituições e comércio; as águas de infiltração, e os despejos industriais, de diversas origens e tipos de indústrias, segundo Von Sperling (1996).

Os efluentes domésticos, que representam “cerca de 80,0% da água captada em ambientes naturais, tratada e distribuída por redes públicas para consumo humano” (BRASIL, 2023), contêm aproximadamente 99,9% de água e cerca de 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, que incluem os microrganismos. Já os efluentes industriais possuem características que variam essencialmente com o tipo da indústria e com o processo industrial utilizado (Von Sperling, 2006).

Em suma, segundo Batista (2015), os efluentes sanitários podem conter em sua composição: sólidos em suspensão (SS) ou dissolvidos (SD), voláteis ou fixos, sedimentáveis e em não sedimentáveis; compostos orgânicos, como proteínas, carboidratos, óleos e graxas, etc; nutrientes, como nitrogênio e fósforo; metais, sólidos inertes, sólidos inorgânicos, compostos não biodegradáveis, organismos patogênicos e, possivelmente contaminantes tóxicos provenientes das atividades industriais; organismos, dentre outros, bactérias, fungos, vírus, protozoários.

Portanto, devido à presença de impurezas, torna-se essencial tratar os esgotos para evitar a poluição e contaminação dos recursos hídricos (BRASIL, 2023). Esse processo de tratamento, que pode ser realizado por meio de diversos sistemas, resulta na produção de um subproduto em todas as suas formas. Isso ocorre pela remoção de sólidos sedimentáveis do esgoto, pelo uso de produtos químicos que reagem com o esgoto e geram sólidos em suspensão, ou ainda através de tratamentos biológicos que transformam matéria orgânica biodegradável em flocos de sólidos suspensos voláteis, que são então removidos do líquido com relativa facilidade (Tsutiya, 2002, p.11). Esse subproduto, conhecido como lodo, requer uma gestão adequada tanto durante o tratamento quanto em sua disposição final.

3.1.1 Definição de lodos de esgotos sanitários

De acordo com a Norma Técnica Brasileira (NBR) nº 12.209/2011, que trata do projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário, o lodo é definido como uma suspensão aquosa de substâncias minerais e orgânicas separadas durante o processo de tratamento. Este subproduto é gerado nos sistemas de tratamento de esgoto e, segundo Andreoli et al. (1999, apud METCALF-EDDY, 1985), é o mais volumoso e complexo em termos de tratamento e disposição final entre todos os subprodutos do processo.

Em outras palavras, o lodo é uma mistura heterogênea composta por um líquido ou semi-sólido e partículas sólidas insolúveis que se depositam por gravidade. É uma suspensão complexa, principalmente orgânica, com diferentes teores de componentes inorgânicos

sólidos e coloidais, que são separados das águas residuais durante o processo de tratamento, como explicado por Carvalho *et al.* (2015) e Muter (2022).

Estudos indicam que o lodo representa de 1 a 2% do volume do esgoto tratado. Vários autores ressaltam os custos significativos associados ao gerenciamento do lodo, que incluem tanto o tratamento quanto a disposição final, podendo representar 60% dos custos operacionais totais. Além disso, Andreoli *et al.* (1999) destaca que o acúmulo de lodo no sistema requer seu descarte periódico, conforme o sistema de tratamento de onde ele provém, para assegurar a eficiência contínua da estação de tratamento sem comprometimentos.

Figura 1- Lodo bruto de lagoa facultativa



Fonte: Bindá (2022)

3.1.2 Característica do lodo

Segundo Andreoli *et al.* (1999), as características quantitativas e qualitativas do lodo são influenciadas pela vazão e pelas características do esgoto tratado na estação, além do tipo de pré-tratamento, tratamento e operação da ETE. Variáveis operacionais como a eficiência do sistema, que pode reduzir a produção de lodo, e a idade do lodo, definida por Batista (2015) como a proporção de massa biodegradável disponível para o metabolismo bacteriano, estão diretamente ligadas à complexidade do fluxograma de tratamento da estação.

Tsutiya (2002) acrescenta que as características do lodo variam conforme o tipo (primário, secundário) e o processo de tratamento aplicado. Andreoli (2006) distingue o lodo primário como sedimentável no esgoto bruto, tratado apenas físico quimicamente, e o lodo secundário como aquele gerado em processos biológicos. Adicionalmente, existe o lodo misto, resultado do tratamento combinado dos lodos primário e secundário, conforme Batista

(2015), e ocasionalmente o lodo químico, formado na etapa físico-química de algumas ETEs para remoção de nutrientes (VAN HAANDEL; MARAIS, 1999).

O quadro 1 apresentado abaixo relaciona os tipos de lodo com as etapas constituintes do sistema de tratamento de efluentes em uma ETE da qual originam.

Quadro 1 - Subproduto gerado nas etapas da ETE.

Subproduto gerado	Etapa de origem na ETE
Lodo primário	Tanque séptico e decantador primário
Lodo biológico aeróbio (não estabilizado)	Lodos ativados convencional e reatores aeróbios com biofilme (alta carga)
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	Lodos ativados - aeração prolongada e reatores aeróbios com biofilme (baixa carga)
Lodo biológico anaeróbio (não estabilizado)	Lagoas de estabilização, reatores UASB e filtros anaeróbicos
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química e Lodos ativados com precipitação de fósforo

Fonte: Adaptado de Pedroza (2010)

Já no quadro 2 abaixo, são apresentados as características dos diversos tipos de lodo em função da etapa de tratamento de esgoto.

Quadro 2 - Características dos tipos de lodo.

(continua)

Origem do lodo	Produção de lodo (gSS/hab.dia)	Estabilidade	Aspecto	Desaguamento
Decantador primário	35 - 45	Necessita estabilização	Marrom a marrom escuro, aparência floculenta, odor pouco ofensivo, tende a tornar-se séptico e gerar odores rapidamente	Boa
Aeração prolongada	38 - 45	Estabilizado	Negro, aparência floculenta, odor não ofensivo	Regular
UASB	7- 18	Estabilizado		Boa
Filtro anaeróbio (após UASB)	3 - 9	Estabilizado		Boa
Lagoas anaeróbicas	13 - 45	Estabilizado		Boa

Quadro 2 - Características dos tipos de lodo.

(conclusão)

Origem do lodo	Produção de lodo (gSS/hab.dia)	Estabilidade	Aspecto	Desaguamento
Lagoas Facultativas	20 - 25	Estabilizado	Negro, aparência flocculenta, odor não ofensivo	Bom
Lagoas de maturação	3 - 20	Estabilizado		Bom
Filtro biológico de alta taxa - Lodo secundário	20 - 30	Necessita estabilização	-	-
Lodo ativado convencional	40 - 60	-	-	-

Fonte: Adaptado de Batista (2015)

3.1.2.1 Composição do lodo e características químicas

A composição do lodo, assim como a do esgoto do qual derivam, pode variar em função do local de origem e do tipo de esgoto tratado, se domiciliar ou industrial (Carvalho *et al.*, 2015). Segundo Batista (2015), o lodo concentra nutrientes, matéria orgânica, metais pesados e organismos patogênicos. Tsutiya (2002) destaca que as principais características químicas incluem metais pesados, nutrientes e compostos orgânicos.

Os metais pesados, conforme Tsutiya (2001), são elementos como metais, semi-metais e até não-metais como o selênio, que contaminam o meio ambiente e prejudicam a biota. Andreoli (1999) identifica três origens para a presença de metais no lodo: dos rejeitos domésticos, através das canalizações, fezes e águas residuárias de lavagem que contenham alguns metais; das águas pluviais, a partir das águas de escoamento de superfícies metálicas ou das ruas carregam resíduos de metais dispersos na fumaça de veículos; e dos efluentes industriais que representam a principal fonte de metais no esgoto, e que variam conforme a atividade industrial.

Dentre os compostos orgânicos podemos citar os micropoluentes orgânicos e os emergentes. Os micropoluentes orgânicos, exemplificados por Andreoli (1999), são: hidrocarbonetos aromáticos, fenólicos, pesticidas, polibromenatos, bifenil (PBBs), policlorinato bifenila (PCBs) e outros materiais persistentes altamente tóxicos, e representam substâncias que possuem baixa biodegradabilidade, por possuírem estruturas químicas

complexas, os microrganismos não conseguem degradá-las, e acabam se acumulando no lodo, características essas que, de acordo com Andreoli (1999), as tornam relativamente estáveis no solo. Além disso, são potencialmente perigosos para humanos e animais por serem solúveis e se acumularem no tecido e serem transmitidas através da cadeia alimentar.

Os micropoluentes emergentes abrangem uma variedade de substâncias encontradas em medicamentos, desinfetantes, meios de contraste, detergentes, surfactantes, pesticidas, corantes, tintas, conservantes, aditivos alimentares e produtos de cuidados pessoais (Batista, 2015). Esses compostos também podem ser encontrados em lodo biológico. E por fim os nutrientes, tanto os macronutrientes, como nitrogênio e fósforo, presentes em maior fração, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, quanto os micronutrientes, como cobre, zinco, manganês, boro, molibdênio e cloro, e a matéria orgânica, segundo Tsutiya (2002).

Conclui-se, portanto, que a composição química do lodo é altamente variável, dependendo da origem do esgoto, de sua composição e dos processos aos quais será submetido para tratamento. Um parâmetro químico importante que influencia as espécies químicas presentes é o pH.

Embora alguns elementos de sua composição precisam ser monitorados devido aos riscos associados à saúde da população e ao meio ambiente e conseqüente limitação quanto destinações finais alternativas, Andreoli (2006) ressalta que em virtude do alto teor de material orgânico, nitrogênio e fósforo, a princípio, se submetido a um tratamento adequado, o lodo pode ser utilizado como fertilizante na agricultura.

3.1.2.2 Características físicas

As características físicas do lodo são bastante variáveis e abrangem uma série de parâmetros, como odor, viscosidade, tamanho das partículas, teor de umidade, densidade, coloração variada, concentração de sólidos, e peso específico, entre outros. Assim como as características químicas, variam conforme o tipo de lodo e os processos de tratamento pelos quais ele é submetido.

Como descrito por Batista (2015) e Fernandes e Souza (2001), nos sistemas convencionais de tratamento de esgoto, o processo se inicia com um decantador primário, seguido por um tanque de aeração e um decantador secundário. Esse processo gera o lodo primário, também chamado de lodo bruto, que se sedimenta com coloração acinzentada, consistência pegajosa e odor desagradável, sendo um indicativo do grau de estabilização do lodo. Além disso, há a formação do lodo secundário, conhecido como lodo ativado, o qual é instável e requer processos adicionais de estabilização.

O tamanho das partículas, como exposto por Tsutiya (2001), é o principal fator que influencia o desaguamento do lodo, pois determina sua resistência. Partículas menores apresentam maior resistência ao desaguamento, o que significa uma maior capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, um maior consumo de produtos químicos para o condicionamento.

A umidade, por sua vez, influencia significativamente as propriedades mecânicas do lodo, afetando tanto seu manuseio quanto sua disposição final, além de influenciar seu volume (Von Sperling e Gonçalves, 2001; Metcalf & Eddy, 1991). Segundo os autores, a densidade do lodo é determinada pela distribuição relativa de seus componentes: a água, com densidade aproximada de 1; os sólidos fixos, que possuem densidade em torno de 2,5; e os sólidos voláteis, cuja densidade é aproximadamente 1.

Na tabela 1 abaixo são apresentados os teores de sólidos, secos e voláteis, o peso específico do lodo e dos sólidos que o compõem, apresentadas por Tsutiya (2002).

Tabela 1 - Características físicas do lodo de esgoto.

Parâmetro	Lodo primário	Lodo secundário	Lodo desidratado
Sólidos secos	2- 6%	0,5 - 2%	15 - 35%
Sólidos voláteis	60 - 80%	50 - 70%	30 - 60%
Peso específico do lodo	~ 1,02	~1,05	~1,1
Peso específico dos sólidos do lodo	~1,4	~1,25	~ 1,2 - 1,4
Tamanho da partícula (90%) (μm)	>22	<100	<100

Fonte: Adaptado de Tsutiya (2002)

3.1.2.3 Características microbiológicas

O lodo de esgoto, segundo Tsutiya (2002), contém uma grande variedade de microrganismos, sendo uma parte atuante dos processos de tratamento biológicos de esgotos, e a outra constituída por vírus, bactérias, fungos, protozoários e helmintos que são patogênicos. Batista (2015 apud USEPA, 1992; Soccol et al., 2010) cita, dentre os agentes mais frequentes para cada uma das classes:

- Bacterianos: *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* e *Leptospira sp.*
- Virais: vírus da hepatite A, rotavírus, enterovírus e reovírus.
- Protozoários: *Cryptosporidium*, *Entamoeba Histolytica*, *Giardia lamblia*, *Balantidium coli* e *Toxoplasma gondii*.

- Helmintos: *Ascaris lumbricoides*, *Ascaris suum*, *Toxocara sp.*, *Trichuris Trichiura*, *Taenia Solium*, *Taenia Saginata*, *Necator americanus* e *Hymenolepis nana*, *Hymenolepis diminuta*.

Tsutiya (2002) explica que esses organismos, inicialmente presentes no esgoto sanitário, são absorvidos pelas partículas sólidas que tendem a precipitar durante a fase de decantação no processo de tratamento de esgoto, concentrando-se assim no lodo de esgoto. Entre os patógenos mencionados, Andreoli (1999) destaca como significativos os estreptococos, *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, larvas e ovos de helmintos, protozoários (cistos) e vírus (como enterovírus e rotavírus), com riscos à saúde corroborados por estudos epidemiológicos, conforme ressaltado por Tsutiya (2002).

Tsutiya (2002) e Andreoli (1999) destacam dois fatores influentes na concentração de patógenos no lodo de esgoto: fatores socioeconômicos e o tempo. Os fatores socioeconômicos, como características da população, condições sanitárias da região geográfica, presença de indústrias agro-alimentares e o tipo de tratamento do lodo de esgoto, afetam a densidade e a quantidade de patógenos presentes, impactando diretamente na sanidade do lodo. Por outro lado, o tempo afeta os organismos devido à sua resistência: enquanto alguns patógenos não conseguem sobreviver no ambiente edáfico por mais do que algumas horas, outros, como ovos de helmintos, podem permanecer viáveis por vários anos (Andreoli, 1999).

No quadro 3 abaixo são apresentadas as diversas concentrações de patógenos em diferentes lodos.

Quadro 3 - Concentração de agentes patogênicos presentes em lodo de esgoto.

(continua)

Agente patogênico	Quantidade de organismos (/gST)	
	Faixa ¹	Média ¹
Vírus Entérico	$4,4 - 7 \times 10^2$	$3,5 \times 10^2$
	$1,2 \times 10^2 - 1,3 \times 10^4$	$6,5 \times 10^3$
Coliforme total	$1,9 \times 10^8 - 1,1 \times 10^{10}$	$5,6 \times 10^9$
Coliforme fecal	$9,2 \times 10^7 - 1,7 \times 10^9$	$8,9 \times 10^8$
	$9,3 \times 10^6 - 1,7 \times 10^9$	$8,9 \times 10^8$
<i>E. coli</i>	$4,4 \times 10^5 - 1,1 \times 10^6$	-

Quadro 3 - Concentração de agentes patogênicos presentes em lodo de esgoto. (conclusão)

Agente patogênico	Quantidade de organismos (/gST)	
	Faixa ¹	Média ¹
Estreptococcus fecal	$3,7 \times 10^5 - 6,6 \times 10^7$	$1,5 \times 10^7$
	$3,5 \times 10^5 - 1,0 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$
Enterococci	$7,2 \times 10^5 - 2,6 \times 10^6$	-
<i>Salmonella</i>	$1,1 \times 10^1 - 6,6 \times 10^7$	$2,9 \times 10^3$
<i>Giardia</i>	$3,1 \times 10^4 - 8,1 \times 10^4$	$5,6 \times 10^4$
	$7,7 \times 10^1 - 3,3 \times 10^3$	$1,7 \times 10^3$

Fonte: Adaptado de SIDHU e TOZI (2009)

Nota:

¹ Os valores apresentados para as quantidades de organismos diferem-se de acordo com as bibliografias apresentadas por SIDHU e TOZI (2009).

3.1.3 Processamento do lodo

Tendo em vista as características apresentadas, Andreoli (2006) apresenta três aspectos indesejáveis que o lodo gerado em sistemas de tratamento de águas residuárias pode exibir, sendo eles:

- instabilidade biológica: fração do lodo composta por material biodegradável, podendo torná-lo putrescível se esta for significativa;
- baixa a qualidade higiênica do lodo, apresentando grande variedade de vírus, bactérias e parasitas, como protozoários, ovos de nematóides e helmintos, que apresenta-se como uma ameaça para a saúde pública;
- baixa concentração dos sólidos suspensos no lodo de modo que o volume produzido é grande.

Para adequar o lodo às normas sanitárias e ambientais, é necessário processá-lo para mitigar os efeitos mencionados. Esse processamento envolve a aplicação de técnicas destinadas a reduzir o teor de material orgânico biodegradável, diminuir a concentração de organismos patogênicos e controlar o teor de água, com o objetivo de produzir um material sólido e estável. Esse material deve ser seguro para manipulação e transporte, além de ser economicamente viável, conforme destacado por Andreoli (2006).

Para definir os tratamentos mais adequados para cada tipo de lodo, é essencial compreender as diversas variações existentes, pois a escolha deve levar em conta as

características específicas desejadas para o lodo, além de atender aos requisitos exigidos pela opção de destino adotada, conforme explicado por Batista (2015).

Dada a composição geral do lodo, seu processamento antes da disposição final geralmente envolve as etapas de adensamento, estabilização, condicionamento e desidratação. Tsutiya (2002, p. 89) explica de maneira concisa que :

a estabilização é utilizada para a redução da massa, controle de odor e redução de microrganismos patogênicos, e o adensamento, o condicionamento, a desidratação e a secagem, para remoção de água, redução do volume e possível redução da massa de lodo.

Além dos aspectos apresentados no quadro 2 que interferem diretamente nos processos relacionados ao manejo do lodo, como escolha de tratamento e disposição final, a autora Batista (2015) faz ainda cita algumas características importantes a serem considerados neste gerenciamento:

- produção: quanto maior a eficiência dos sistemas de tratamento, maior a qualidade do efluente e maior a produção de lodo;
- estabilidade: potencial de geração de odor e atração de vetores;
- desidratabilidade: facilidade de desaguamento;
- composição: principalmente em relação à concentração de matéria orgânica (N, P, patógenos) e metais pesados.

As etapas do tratamento do lodo, bem com o seu objetivo e métodos correspondentes são definidos de forma breve no quadro 4 abaixo.

Quadro 4 - Objetivos e métodos das etapas de tratamento do lodo.

Etapas do tratamento	Objetivo	Métodos
Adensamento	Remoção de umidade através de meios físicos e consequente redução de volume	Gravidade; flotação com ar dissolvido; centrifuga; esteira (“belt-press”), tambor rotativo.
Estabilização	Redução da quantidade de patógenos; remoção da matéria orgânica; redução de sólidos voláteis; eliminar maus odores; inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação.	Biológicos (digestão anaeróbia, digestão aeróbica); caleação; compostagem.
Condicionamento	Melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo; preparação para a desidratação (principalmente mecânica).	Químico ; físico.

Etapa do tratamento	Objetivo	Métodos
Desidratação	Remoção de umidade e consequente redução de volume	Secagem natural : leitos de secagem e lagoas de secagem de lodo; mecânicos: filtro prensa de esteira, centrífuga, filtro prensa de placas; membrana geotêxtil, secagem térmica.
Destinação final	Destinação final dos subprodutos	Aplicação no solo; reuso industrial.

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 1996; Andreoli, 2006; e Tsutiya, 2002.

Para que seja viabilizada a aplicação em áreas agrícolas, o lodo de esgoto deve passar por tratamentos que possibilitem a sua estabilização objetivando reduzir odores, patógenos e a atração de vetores (Rigby *et al.*, 2016). Andreoli (2006) expõe que a fração biodegradável da sua composição deve ser reduzida, ou seja, deve ser submetida a processos biológicos como digestão anaeróbia ou digestão aeróbia. Outro processo a ser aplicado é o desaguamento ou a secagem, com a finalidade de aumentar a fração de sólidos, reduzindo, assim, o volume do material e facilitando seu manejo.

3.2 BIOSSÓLIDOS

Após ser processado para garantir um produto estável, com correção das características indesejadas para viabilizar seu uso seguro em aplicações agrícolas (Andreoli, 2006), o lodo é então denominado biossólido.

Figura 2- Biossólido peletizado.



Fonte: Borges (2018)

Esse material, que é derivado de um produto com alto teor de nitrogênio e fósforo, predominantemente orgânico e também contendo outros nutrientes como potássio, conforme

discutido no tópico de composição do lodo, é considerado por diversos autores como um grande atrativo para uso na agricultura. Além de seu rico conteúdo em matéria orgânica, os biossólidos também exercem um papel importante como condicionadores do solo. Dessa forma, seu uso pode substituir parcialmente o uso de adubos químicos, como os fertilizantes nitrogenados e fosfatados, que não são elementos renováveis.

3.2.1 **Propriedades**

O potencial da aplicação do biossólido na agricultura é reforçado por Paz-Ferreira (2018) que destaca as melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Estas, serão apresentadas nos tópicos a seguir.

3.2.1.1 *Propriedades químicas*

Tsutiya (2002) destaca que a aplicação de biossólidos no solo causa um aumento significativo no teor de matéria orgânica, resultando em melhorias na fertilidade do solo. Isso se traduz em um aumento do pH, uma diminuição da acidez potencial e um gradual aumento na disponibilidade de nutrientes como cálcio, magnésio e enxofre. O autor ressalta ainda que os biossólidos contêm todos os nutrientes essenciais e benéficos para o desenvolvimento das plantas. Os macronutrientes e micronutrientes presentes nos biossólidos têm um impacto direto no desenvolvimento e rendimento das plantas (Tsutiya, 2002).

O nitrogênio, proveniente dos dejetos e da massa microbiana dos esgotos, é um componente de grande valor nos biossólidos, podendo ser limitante na dosagem máxima a ser aplicada no solo, devido ao risco de lixiviação e contaminação do lençol freático, conforme explica Tsutiya (2001). Já o fósforo, embora presente em quantidades menores do que o nitrogênio, é essencial para o desenvolvimento das plantas e provém dos dejetos e detergentes utilizados no esgoto. O potássio, apesar de estar presente em pequenas quantidades, é totalmente assimilável pelas plantas. Quanto aos outros macronutrientes, como cálcio, magnésio e enxofre, eles estão presentes nos biossólidos na forma mineral e são capazes de suprir as necessidades das culturas agrícolas mesmo em pequenas aplicações (Tsutiya, 2002; Andreoli et al., 1997).

Além disso, os biossólidos contêm micronutrientes como cobre, zinco, manganês, boro, molibdênio e cloro, que são essenciais para o crescimento das plantas. Quando aplicados em quantidades suficientes para suprir as necessidades de nitrogênio, geralmente os

micronutrientes também são fornecidos em quantidades adequadas para as plantas (Tsutiya, 2002).

Em contrapartida, o biossólido contribui também para a contaminação do solo com metais pesados, que, nas palavras de (Tsutiya, 2002): “ não apenas exercem efeitos negativos sobre o crescimento das plantas, mas também afetam os processos bioquímicos que ocorrem no solo”. Esses metais estão distribuídos por toda a natureza, incluindo o solo, podendo originar-se da rocha de origem ou de outras fontes adicionadas, como cinzas, calcário, ou adubos orgânicos. No entanto, suas concentrações são inferiores àquelas consideradas como tóxicas para diferentes organismos vivos, conforme observado por Tsutiya (2002). A contaminação com estes metais pode inibir a decomposição do material orgânico adicionado ao solo, a mineralização do nitrogênio e a nitrificação.

Tsutiya (2002) categoriza esses metais, presentes nos biossólidos, de acordo com o risco que podem oferecer, ou seja:

- Os que oferecem baixo risco são: manganês, ferro, alumínio, cromo, arsênio, selênio, antimônio, chumbo e mercúrio.
- Os potencialmente perigosos aos homens e aos animais são os seguintes: zinco, cobre, níquel, molibdênio e cádmio.

O autor também classifica os metais pesados que são considerados micronutrientes para as plantas. Dentre os essenciais estão Cu, Fe, Mn, Mo, Zn; como benéficos: Co, Ni, V; e por fim, os não essenciais ou sem função, ou seja, Al, Cd, Cr, Hg, Pb etc.

3.2.1.2 Propriedades físicas

Além da contribuição para a fertilidade do solo e a produção agrícola, conforme citado no item anterior, a concentração de matéria orgânica nos biossólidos, que segundo dados apresentados por Tsutiya (2001), varia de 40 a 70% de sua composição, possui o potencial de elevar a quantidade de húmus no solo. Esse aumento do teor de húmus é essencial para aprimorar a capacidade de armazenamento e infiltração da água no solo, fortalecendo os agregados e mitigando a erosão.

Portanto, pode-se dizer que a matéria orgânica altera propriedades físicas do solo como estrutura, textura, densidade, plasticidade, infiltração de água, porosidade e pegajosidade, conforme Tsutiya (2002).

3.2.1.3 Propriedades microbiológicas

Dentre as propriedades microbiológicas afetadas positivamente pela aplicação de biossólidos no solo podemos citar o favorecimento da vida microbiana, causada pela presença de matéria orgânica (Tsutiya, 2001), e também a ciclagem de nutrientes.

No entanto, essa prática também pode introduzir potenciais patógenos no solo, como fungos, vírus, bactérias, protozoários e helmintos, que podem representar riscos para a saúde humana e animal se não forem adequadamente tratados ou monitorados.

3.2.2 Problemática da contaminação

A problemática da contaminação causada pela aplicação de biossólidos na agricultura está no potencial de danos ambientais, agronômicos e sanitários que sua composição pode causar. AL-GHEETHI, A. *et al.* 2019 explicam que:

As preocupações residem nos metais pesados, sais solúveis e outros constituintes traços que apresentam sérias preocupações e podem danificar solos, plantas, animais e humanos, assim como o potencial de transferência de doenças pela alta diversidade de patógenos no lodo.

Além destes, ressaltam-se outras problemáticas ambientais como contaminação das águas subterrâneas, degradação do solo e desequilíbrios na cadeia alimentar, conforme apresentado por Araújo (2022).

Tsutiya (2002) divide os fatores de riscos associados aos biossólidos em temporários e de longo prazo. Dentre os temporários o autor cita: odor, salinização, poluição das águas e organismos patogênicos. Já dentre os de longo prazo: metais pesados e contaminantes orgânicos. Ou seja, os temporários podem ser interpretados como os efeitos de curta duração que podem afetar temporariamente o ambiente, enquanto os de longo prazo caracterizam os impactos cumulativos, de períodos mais duradouros.

Os metais pesados, quando presentes em teores elevados, podem causar sérios riscos para o desenvolvimento das plantas e para a saúde dos animais, uma vez que são tóxicos dependendo da concentração presente (Andreoli, 1999). Nas plantas eles podem exercer efeitos negativos sobre o crescimento, e no solo, afetam os processos bioquímicos, além de afetar a qualidade do alimento sendo cultivado (Tsutiya, 2002).

O nitrogênio, por sua vez, é destacado por Andreoli (1999) como o fator determinante da aplicação do biossólido, pois quando presente em altas concentrações e devido à alta mobilidade do nitrato no solo, as águas subterrâneas podem sofrer impactos em sua qualidade, sendo contaminadas, podendo tornar-se impróprias para consumo humano se as

concentrações de nitrato estiverem acima de 10 mg. L⁻¹, conforme Portaria nº 36 de 19 de janeiro de 1990 do Ministério da Saúde.

São estes fatores, portanto, que tornam limitantes o uso de biossólidos na agricultura, e que, dessa forma, necessitam de regulamentações de forma a minimizar os riscos associados a tal prática.

3.2.3 Perspectiva internacional da aplicação de biossólidos

Atualmente, a produção anual global de lodo de esgoto é estimada em 45 milhões de toneladas de matéria seca, conforme relatado por Zhang *et al.* (2017), número este, que conforme os autores, reflete um crescimento rápido nesse indicador. Esse aumento pode ser atribuído ao crescimento populacional global e à expansão das estações de tratamento de esgoto, como evidenciado na China, que aumentou o número de estações de 3.508 para 5.300 em apenas três anos, de 2013 a 2016 (Zhang *et al.*, 2017).

Buta *et al.* (2022) destacam que esse crescimento na produção de lodo de esgoto está acompanhado por uma preocupante proporção entre o lodo total gerado e o lodo adequadamente gerenciado. Este cenário é identificado por Muter (2022) como um dos principais desafios do século XXI: o manejo adequado do lodo de esgoto.

Alguns autores listam dentre os maiores produtores de lodo no mundo os países da Europa, Ásia Oriental e América do Norte (Shaddel et al. 2019), assim como Austrália. Os números são apresentados no quadro 5 abaixo.

Quadro 5- Produção de lodo na Europa, Ásia Oriental e América do Norte.

(continua)

Região	País	Produção de lodo (x 1000 toneladas/ano)	Ano	Referência
Europa	França	1.092,90	2020	Eurostat (2024)
	Polônia	584,75	2021	
	Holanda	353,85	2020	
	Turquia	314,33	2021	
	Romênia	264,34	2021	
	Chechênia	235,10	2021	
	Hungria	226,21	2021	
	Suécia	204,80	2021	

Quadro 5- Produção de lodo na Europa, Ásia Oriental e América do Norte.

(conclusão)

Região	País	Produção de lodo (x 1000 toneladas/ano)	Ano	Referência
Ásia Oriental	China	7.808 ¹	2019	MOHURD (Ministério do Desenvolvimento Urbano-Rural da China)
	Japão	1.650,28	2020	JSWA - Japan Sewage Works Association
América do Norte	Estados Unidos	3.760 ²	2022	USEPA (2023)
Oceania	Austrália	349	2021	Department of Sustainability, Environment, Water, Population and Communities

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Notas: ¹Valor referente à parte seca, dos 39,04 milhões de toneladas com 80% de água, fornecidos pelo Ministério do Desenvolvimento Urbano-Rural da China; ²Valor estimado.

A disposição final do lodo tem diversas alternativas já aplicadas ao redor do mundo, como a compostagem, aplicação na agricultura, disposição em aterros sanitários, entre outras. Desta forma, o lodo ao invés de ser considerado um resíduo, pode ser considerado subproduto (Rorat *et al.*, 2019), uma vez que este está sendo cada vez mais utilizado e sendo aplicado nos princípios da sustentabilidade.

Entre as diversas possibilidades de reutilização do lodo, os bio sólidos continuam amplamente utilizados como fertilizante orgânico e condicionador de solo, e ainda representa o método mais econômico para reciclar de forma benéfica seu conteúdo de nutrientes e carbono nos solos (Okoffo *et al.*, 2020).

Nas palavras de Vanzo (2001): “milênariamente os excretas humanas fertilizam as terras agricultáveis da China, mais recentemente, desde os fins do século XIX, os campos da Austrália, e desde o início dos anos 90, os solos de Brasília”. Essa prática, que é exercida por longos tempos, apresenta-se como uma das alternativas mais usuais da disposição final do lodo em países desenvolvidos, conforme Tsutiya (2001). Ou seja, o lodo é aplicado em forma de bio sólido. Nestes países, seu uso formal na agricultura é estritamente regulamentado, segundo (Mateo-Sagasta, Rashid-Sally e Thebo, 2015).

Alguns autores destacam a prática como uma das principais formas de gerenciamento de lodo de esgoto em países ocidentais membros da União Européia, Canadá, Estados Unidos e Austrália (Buta *et al.*, 2022; Shaddel *et al.*, 2019; Marchuck, 2023). Enquanto os países da América do Sul são considerados por Buta *et. al* (2022) como os subdesenvolvidos em

comparação aos Estados Unidos, quanto ao gerenciamento de lodo de esgoto, pelo argumento de que resultam de regulamentações legais e diferentes níveis de infraestrutura.

4 METODOLOGIA

O objetivo da revisão acerca da qual foi baseado este trabalho, é realizar um comparativo da legislação dos países com alta adoção da prática de aplicação de lodo de ETE na agricultura, com a legislação do Brasil, cujos índices são inferiores e que é o objeto central desta análise. Por conseguinte, através dos conhecimentos adquiridos pelo estudo da legislação brasileira, analisar a qualidade dos biossólidos produzidos por diferentes tratamentos, aos quais o lodo pode ser submetido.

A metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo consistiu no levantamento de dados, por meio de pesquisa em bases de artigos científicos, como *Google Scholar*, *Scielo* e *Science Direct*, bancos de dados governamentais em portais estatísticos e legislações e ainda bibliografias reconhecidas em nível nacional sobre o tema.

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise foi conduzida de maneira a compreender de que forma as legislações refletem na aplicação dos biossólidos, afetando a divergência dos índices da destinação final do lodo para a agricultura nos países. Busca-se, portanto, obter informações para o cenário do Brasil, de forma a concluir se, por exemplo, o baixo índice da prática no país é reflexo dos desafios regulatórios encontrados. E através das divergências destacadas pela análise comparativa, pontuar os fatores que podem ter levado ao sucesso da prática nessas outras nações, e que, sugestivamente, poderiam ser aplicados no Brasil.

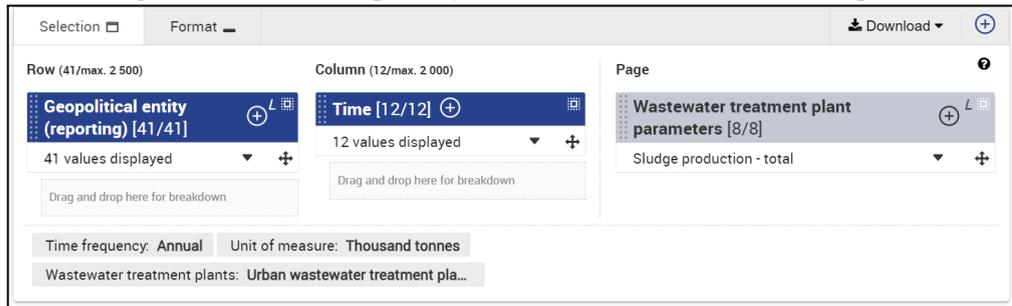
4.1.1 Critério de escolha dos países

A primeira análise realizada visou definir os países cujas legislações seriam abordadas e comparadas com a brasileira. O critério inicial foi o destaque evidenciado por alguns autores sobre a prática da aplicação de biossólidos na agricultura como uma das alternativas mais usuais da disposição final do lodo em países desenvolvidos com ênfase nos membros da região ocidental da União Europeia, América do Norte e Austrália, conforme exposto no item 3.2.3 - Perspectiva Internacional da Aplicação de Biossólidos.

Primeiramente, foram obtidos os dados dos países da União Europeia. A busca foi realizada através do portal de Estatísticas da União Europeia, EUROSTAT, que dispõe dados

sobre a produção total de lodo de esgoto em cada um dos países da União, bem com os números de cada disposição final, como agricultura, incineração, etc. Para o primeiro levantamento, foi selecionado o parâmetro “*Sludge production - total*”, a ser visualizado no lado esquerdo da figura 3 abaixo. Com isso, a plataforma oferece os dados em forma de tabela, gráficos ou mapas. Para a análise, selecionou-se a opção de tabela, nela, os dados são apresentados na unidade de x1000 de toneladas, e são apresentados nas figura 4 e 5.

Figura 3- Parâmetro produção total de lodo na União Européia.



Fonte: Eurostat (2024)

Figura 4- Produção de lodo nos países da União Europeia- Parte 1.

	2017	2018	2019	2020	2021
European Union - 27 countries (from 2020)	:	:	:	:	:
Euro area - 20 countries (from 2023)	:	:	:	:	:
Euro area - 19 countries (2015-2022)	:	:	:	:	:
Belgium	:	:	:	:	:
Bulgaria	68.60	53.10	44.43	:	:
Czechia	223.27	228.22	221.09	219.11	235.10
Denmark	:	:	:	:	:
Germany	1 785.55	1 761.62	1 749.86	:	:
Estonia	20.94	25.54	19.48	18.99	20.22
Ireland	58.77	55.23	58.63	58.45	60.47
Greece	103.28	103.28	103.28	98.55	98.55
Spain	1 192.00	1 210.40	:	:	:
France	1 174.00	:	:	1 092.90	:
Croatia	17.60	19.23	20.65	21.71	27.46
Italy	:	:	:	:	:
Cyprus	7.17	8.41	8.68	8.22	8.83
Latvia	25.62	25.14	25.09	23.27	18.99
Lithuania	42.49	44.19	39.94	41.05	39.63
Luxembourg	9.32 (e)	9.08 (e)	8.89 (e)	9.47 (e)	9.36 (e)
Hungary	266.84	233.66	227.89	167.03	226.21
Malta	10.30	8.28	9.69	10.36	10.37
Malta	:	:	:	:	:

Fonte: Eurostat (2024)

Figura 5- Produção de lodo nos países da União Europeia- Parte 2.

TIME	2017	2018	2019	2020	2021
GEO					
Hungary	266.64	233.06	227.89	167.03	226.21
Malta	10.30	8.28	9.69	10.36	10.37
Netherlands	:	341.77	:	353.85	:
Austria	:	234.48	233.56	228.01	193.62
Poland	584.45	583.07	574.64	568.86	584.75
Portugal	:	:	:	:	:
Romania	283.34	247.76	230.59	254.22	264.34
Slovenia	36.70	38.10	34.80	31.00	27.48
Slovakia	54.52	55.93	54.83	55.52	54.76
Finland	161.19	146.62	160.17	153.65	:
Sweden	205.60	211.60	212.80	208.30	204.80
Iceland	:	:	:	:	:
Liechtenstein	:	:	:	:	:
Norway	:	147.60	141.35	157.15	169.61
Switzerland	177.00	:	:	:	:
United Kingdom	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	9.50	9.50	9.50	:	:
Montenegro	:	:	:	:	:
North Macedonia	:	:	:	:	:
Albania	98.12	94.50	96.20	97.10	96.00
Serbia	13.30	15.85	15.63	17.58	22.07
Türkiye	:	318.50	:	314.33	:

Fonte: Eurostat (2024)

Em seguida, realizou-se o mesmo procedimento, porém agora selecionando o parâmetro de “Sludge disposal - agriculture use” para obtenção dos números referentes a disposição do lodo na agricultura. A seguir, nas figuras 6 e 7, são apresentados, respectivamente, o parâmetro e as tabelas com os dados de cada país.

Figura 6- Parâmetro disposição de lodo na agricultura na União Européia.

Row (41/max. 2 500)	Column (12/max. 2 000)	Page
Geopolitical entity (reporting) [41/41] 41 values displayed Drag and drop here for breakdown	Time [12/12] 12 values displayed Drag and drop here for breakdown	Wastewater treatment plant parameters [8/8] Sludge disposal - agricultural use
Time frequency: Annual Unit of measure: Thousand tonnes Wastewater treatment plants: Urban wastewater treatment pla...		

Fonte: Eurostat (2024)

Figura 7- Disposição de lodo na agricultura nos países da União Europeia.

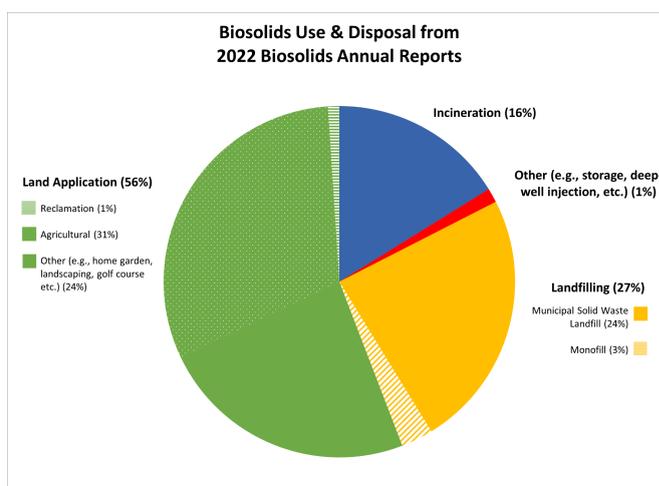
TIME	2016 ↓	2017 ↓	2018 ↓	2019 ↓	2020 ↓
GEO ↓					
European Union - 27 countries (from 2020)	:	:	:	:	:
Euro area - 20 countries (from 2023)	:	:	:	:	:
Euro area - 19 countries (2015-2022)	:	:	:	:	:
Belgium	29.65	30.62	32.16	35.82	35.95
Bulgaria	26.20	22.50	29.80	25.66	:
Czechia	98.51	102.94	108.31	114.31	84.81
Denmark	85.00	78.00	71.00	88.00	82.00
Germany	423.50	311.91	280.33	287.48	:
Estonia	2.12	2.77	3.25	12.08	10.38
Ireland	45.34	46.49	44.00	52.14	51.79
Greece	21.53	10.19	10.19	10.19	4.75 (b)
Spain	941.60	997.10	1 052.70	:	:
France	351.00	299.00	:	:	330.82
Croatia	0.87	1.09	1.55	0.47	0.48
Italy	:	:	:	:	:
Cyprus	1.61	1.08	0.94	1.02	1.01
Latvia	4.32	3.39	4.16	6.83	6.16
Lithuania	9.70	20.82	15.89	15.05	12.29
Luxembourg	1.55 (e)	1.16 (e)	2.00 (e)	1.77 (e)	1.98 (e)
Hungary	25.91	28.20	34.09	43.77	18.01
Malta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Netherlands	0.00	:	0.00	:	0.00
Austria	48.31	:	48.17	49.70	48.36
Poland	116.03	108.52	118.33	123.78	137.77
Portugal	13.89	:	:	:	:
Romania	17.56	35.00	46.39	43.56	54.12
Slovenia	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
Slovakia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Finland	63.00	74.05	64.08	64.07	59.02
Sweden	69.50	71.20	82.30	88.00	96.30
Iceland	:	:	:	:	:
Liechtenstein	:	:	:	:	:
Norway	65.70	66.00	65.40	56.59	68.74
Switzerland	:	0.00	:	:	:
United Kingdom	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	0.00	0.00	0.00	0.00	:
Montenegro	:	:	:	:	:
North Macedonia	:	:	:	:	:
Albania	42.50	10.30	8.20	5.50	3.78
Serbia	:	:	:	:	:
Türkiye	19.47	:	11.36	:	3.51

Fonte: Eurostat (2024)

Para a obtenção do percentual referente à disposição do biossólido na agricultura, os dados foram organizados em forma de tabela, e pelo EXCEL, através da relação do montante total, e o disposto na agricultura, encontrados os percentuais referentes, e posteriormente posicionados de forma decrescente. Para isso, foram filtrados apenas os países pertencentes à região ocidental da União Europeia, conforme critério exposto anteriormente. Desta busca, conclui-se também que a Itália, Bósnia, Reino Unido entre outros países não possuem os dados divulgados, sendo descartados desta análise.

Quanto aos países norte americanos, optou-se pelo levantamento de dados referentes aos Estados Unidos, que produz altos teores de lodo de esgoto, estimado em 3,76 milhões de toneladas anualmente, e possui uma das legislações mais antigas, tendo sido utilizada como base para alguns outros países. Os dados foram obtidos através do portal da USEPA (United States Environmental Protection Agency) que disponibiliza as informações básicas sobre os biossólidos, bem como o percentual de destinação para a agricultura, conforme figura abaixo.

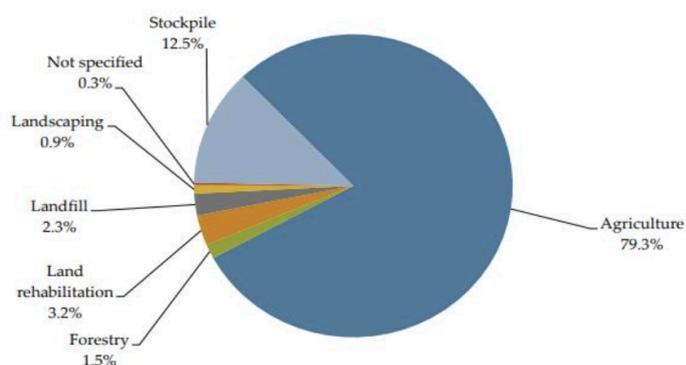
Figura 8 - Disposição do biossólido nos Estados Unidos.



Fonte: USEPA (2022)

Quanto à Austrália, realizou-se uma exploração bibliográfica de documentos técnico-científicos, para comprovação de que a Austrália destaca-se na disposição de lodo na agricultura e obteve-se a informação de que o país possui uma das regulações mais restritas no mundo para o uso de biossólidos. Por meio do site oficial australiano, que dispõe das estatísticas relacionadas ao lodo, encontrou-se o percentual de destinação para a agricultura.

Figura 9- Destinação do lodo na Austrália.



Fonte: AWA (2023)

As informações acima citadas são apresentadas no quadro a seguir.

Quadro 6 - Utilização de biossólidos na agricultura em diversos países.

País	Utilização na agricultura (%)	Ano de referência	Referência
Irlanda	91,3	2021	Eurostat (2024)
Estonia	68,0	2021	
Suécia	49,8	2021	
Noruega	40,3	2021	
Finlândia	38,6	2020	
Chechênia	37,6	2021	
França	30,3	2020	
Lituânia	29,4	2021	
Letônia	29,3	2021	
Polônia	26,7	2021	
Áustria	24,7	2021	
Romênia	15,3	2021	
Hungria	9,7	2021	
Estados Unidos	31,0	2022	USEPA (2023)
Austrália	79,3	2023	AWA (2024)
Brasil	14,0	2022	Sanepar (2022)

Fonte: Elaborada pela autora (2024).

Desta forma, diante dos percentuais acima observados, pelo destaque do percentual da disposição de lodo na agricultura da Irlanda, de 91,3%, que representa um grande salto quando comparado com os 12% que o país destinava para a agricultura em 1999, segundo Tsutiya (2002 apud Matthews, 1999), optou-se por sua escolha para constituir a análise comparativa.

Outro fator que fomenta a comparação entre os países escolhidos é que as regulações da Austrália, acerca do tema abordado neste trabalho, foram desenvolvidas baseadas nas diretrizes europeias e norte-americanas (Hill, 2005). Desta forma, a análise poderá apontar essas semelhanças, ou alterações realizadas, que resultaram em divergências na eficiência no setor, uma vez que a disposição na Austrália apresenta menores índices do que a Irlanda, porém maiores do que os Estados Unidos.

E quanto ao Brasil, onde a disposição na agricultura é feita de forma muito menos desenvolvida do que estes outros três países, com baixo percentual de 14%, a análise

comparativa permitirá pontuar as semelhanças e divergências, investigando possíveis deficiências, ou se os atores causadores do déficit no cenário brasileiro são desafios regulatórios ou outros possíveis obstáculos.

Em suma, a análise comparativa será realizada entre as legislações que regulamentam o uso de bio sólidos na agricultura na Irlanda, na Austrália, nos Estados Unidos e no Brasil.

4.1.2 Legislações

O primeiro passo consistiu na busca por esses documentos. Para o Brasil, a busca por “Regulamentação do uso de bio sólidos no Brasil” através da ferramenta de pesquisa do Google, resultou na obtenção do site oficial do CONAMA no qual a resolução é apresentada. No caso da Irlanda, a busca foi direcionada tanto pelo artigo de COLLIVIGNARELLI (2019), que apresenta a revisão acerca das legislações dos países da Europa para a utilização de bio sólidos na agricultura, quanto pelos slides Ireland (1988), intitulado “*Sewage Sludge in Agriculture – An Irish Perspective*”, obtidos pela pesquisa de “*Sewage Sludge in Agriculture Ireland*” no Google.

Para a Austrália, a mesma pesquisa foi realizada no google, ou seja “*Sewage Sludge in Agriculture in Australia*”, e o resultado foi o documento de autoria de DARVODELSKY (2011), realizado para o Departamento de Sustentabilidade, Meio Ambiente, Água, População e Comunidades, que fornece a informação da regulação individual para cada um dos estados no país. Com isso, foi realizada a busca desses documentos que são dispostos no site oficial da Parceria entre Austrália e Nova Zelândia sobre bio sólidos, na aba das Diretrizes de Gestão de Bio sólidos.

Já no caso dos Estados Unidos, as informações e documentos foram obtidos diretamente no site da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), pela procura de “*Biosolids*” na barra de pesquisa, sendo selecionado o primeiro item resultante. Este leva para uma página direcionada somente aos bio sólidos, e que fornece informações de uso, classes, e apresenta como são regulados e as legislações, em “*How Biosolids are Regulated*”.

Portanto, de maneira geral, através de sites oficiais e artigos relacionados, realizou-se a leitura e simultaneamente, a análise, que foi conduzida para analisar os parâmetros de controle, tanto químicos quanto microbiológicos, as classificações bem como usos e restrições, com o objetivo de pontuar as diferenças encontradas entre elas quanto aos parâmetros de controle e as medidas de mitigação aos riscos.

4.2 QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BIOSSÓLIDOS

Na legislação brasileira, a aplicação dos biossólidos é regida pela qualidade microbiológica, que está diretamente relacionada aos tipos de tratamento e aos critérios operacionais. Assim, para atender ao segundo e terceiro objetivo específico deste trabalho, que visam respectivamente investigar a qualidade microbiológica dos biossólidos de diferentes tipos de lodo submetidos a tratamentos distintos e realizar uma análise da efetividade dos critérios operacionais exigidos, serão explorados estudos de caso sobre os produtos de processos que visam à redução de patógenos.

Em conformidade com a regulamentação vigente, especificamente a Resolução CONAMA 498/2020, que foi objeto de estudo na análise comparativa do objetivo 1, o estudo concentrou-se na busca por estudos de caso de biossólidos de Classe A, provenientes de processos com redução adicional de patógenos e de Classe B, com redução significativa de patógenos.

4.2.1 Tratamentos de lodo

Para a busca dos estudos de caso, considerou-se os processos de tratamento expostos na resolução CONAMA 498/2020, cujas descrições e requisitos atrelados encontram-se no quadro 7 abaixo.

Quadro 7- Processos de tratamento e requisitos exigidos e considerados

(continua)

Classe	Processo	Requisito
A	Compostagem	Confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55° C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55° C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias, ao longo dos 15 do processamento)
	Secagem térmica	Direta ou indireta para reduzir o teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C
	Tratamento térmico	Aquecimento do lodo de esgoto sanitário, na forma líquida, a 180° C, no mínimo, durante um período de 30 minutos

Quadro 7- Processos de tratamento e requisitos exigidos e considerados
(conclusão)

Classe	Processo	Requisito
A	Digestão aeróbia	Termofílica a ar ou oxigênio, com tempos de residência de 10 dias, sob temperaturas de 55 a 60° C
	Processos de irradiação	Com raios beta a dosagens mínimas de 1 megarad a 20° C, ou com raios gama na mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137
	Processos de pasteurização	Pela manutenção do lodo de esgoto a uma temperatura mínima de 70° C, por um período de pelo menos 30 minutos
B	Digestão aeróbia	A ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias, sob temperatura de 20°C ou por 60 dias, sob temperatura de 15°C
	Secagem	Em leitos de areia ou em bacias (solarização) pavimentadas ou não, cobertas ou não, até atingir teor de sólidos mínimo de 60%
	Digestão anaeróbia	Digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35- 55°C ou de 60 dias a 20°C
	Compostagem	Por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período
	Estabilização com cal	Mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas

Fonte: Adaptado de CONAMA (2020)

4.2.2 Levantamento de dados

As pesquisas concentraram-se nos estudos de caso que apresentassem a redução dos seguintes parâmetros microbiológicos: Coliformes fecais, *Salmonella sp.*, ovos viáveis de helmintos e vírus entéricos. E para tal, estabeleceu-se como critérios de inclusão e exclusão o englobamento dos processos de tratamento do lodo e os critérios operacionais expostos e exigidos pela legislação como pH, temperatura e período, apresentados no quadro 7.

As buscas foram realizadas em bases de dados acadêmicas como Google Scholar e ScienceDirect, para identificar artigos e publicações pertinentes. Além disso, revisões bibliográficas e referências de artigos relevantes foram consultadas para ampliar a busca e

assegurar uma cobertura abrangente do tema, uma vez que alguns dos tratamentos apresentaram poucos estudos de caso como resultado.

Todos os estudos encontrados foram analisados para a identificação dos critérios operacionais. Em alguns casos, os critérios não foram atendidos de forma geral, como por exemplo a temperatura ou o período, porém, apresentaram a redução significativa e necessária para enquadrar-se próprio para a aplicação na agricultura, e por isso, foram agrupados nos resultados deste trabalho, sendo discutidos.

Dessa forma, com os resultados obtidos, construiu-se uma tabela que relaciona o tratamento com os parâmetros. Além da análise da qualidade microbiológica dos biossólidos de diversas fontes, foi possível discutir a efetividade dos processos através dos critérios de operação empregados nos estudos, analisando o enquadramento dos produtos obtidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA

Neste tópico, serão apresentadas as legislações consideradas para a análise comparativa, e então, as semelhanças e diferenças encontradas quanto à classificação dos biossólidos e seus critérios, os limites de concentrações de poluentes e parâmetros microbiológicos regulados, e por fim, os usos e restrições relacionados.

5.1.1 Legislações

5.1.1.1 Brasil

No Brasil, a primeira legislação federal específica para o uso de biossólidos na agricultura surgiu em 2006. A resolução CONAMA nº 375/2006, de 29 de agosto de 2006, que logo foi retificada pela Resolução CONAMA nº 380/2006, de 31 de outubro de 2006, posteriormente revogada pela Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020, que segue em vigência.

Ela define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e considera que o uso do lodo de esgoto em solos é uma alternativa de destinação ambientalmente adequada e, portanto, se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos conforme Lei nº 12.305, de 2010.

A resolução classifica os biossólidos e apresenta os critérios considerados para tal, bem como o detalhamento dos parâmetros operacionais para obtenção dos biossólidos de cada classe, onde são apresentados os processos e requisitos. E a partir desta classificação, a

resolução expõe os usos permitidos e respectivas restrições, e também o tempo entre a aplicação do biofóssido e o cultivo ou colheita dos produtos alimentícios.

5.1.1.2 Irlanda

Na Europa, em 1986, segundo Carvalho e Carvalho (2002), o Conselho Diretor da Comunidade Econômica Européia promulgou a Diretiva 86/278/EEC relativa à proteção do ambiente, e em particular do solo, na utilização agrícola de lodo de esgoto. COLLIVIGNARELLI et al. (2019) expõe que nela, foram introduzidos os valores limites para proteger a saúde humana através da aplicação de biofóssidos de boa qualidade. A Diretiva foi emendada pela Decisão 2018/853 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018.

Conforme a definição dada pela União Européia, a diretiva é um ato legislativo que fixa um objetivo que os países da UE têm de alcançar, e para isso, cabe a cada país organizar as suas próprias leis. No caso, a Diretiva 86/278/EEC permite que os Estados-Membros estabeleçam regulamentações nacionais mais rigorosas do que ela, em termos de valores limites e restrições, e, também, que escolham entre valores limites no solo ou no biofóssido.

No caso da Irlanda, foram estabelecidos limites para biofóssidos e solos, os quais foram adotados semelhantes aos da Diretiva Europeia, transposta para o Instrumento Legislativo nº 148 de 1998 intitulado “Regulamento de gestão de resíduos (Utilização de lodo de esgoto na agricultura), emendado pelo Instrumento Normativo nº 267 de 2001. Além deste, existe no país o “Código de Boas Práticas para o Uso de Biofóssidos na Agricultura”.

Portanto, na Irlanda, a aplicação de biofóssidos na agricultura é regulada e orientada por estes dois documentos. A legislação como dito anteriormente, estabelece os limites de concentrações e as restrições, enquanto o Código é designado especificamente aos produtores de biofóssidos, apresentando um guia de obrigações e recomendações em relação aos tratamentos, transporte e dispersão dos biofóssidos, controle de qualidade, planejamento da gestão de nutrientes, entre outras informações à serem aplicadas em todas as partes do país de maneira a garantir um uso seguro e benéfico da utilização de biofóssidos na agricultura.

5.1.1.3 Austrália

A regulamentação dos biofóssidos na Austrália, conforme destacado por Darvodelsky (2011), está bem estabelecida há 15 anos e é conduzida de maneira específica em cada uma de suas regiões, que incluem os estados de Nova Gales do Sul, Queensland, Austrália do Sul,

Tasmânia, Victoria, Austrália Ocidental, além dos territórios do Território do Norte e Território da Capital Australiana (TCA). Em cada uma dessas jurisdições, são estabelecidos governos para regular o tratamento, manejo, descarte e uso dos bio sólidos. Segundo o documento “Snapshot Biosolids” de Darvodelsky (2011), as regulamentações são fundamentadas na legislação ambiental vigente de cada estado, mas de maneira geral:

exigem que qualquer descarga para o ambiente seja gerenciada de forma que não afete adversamente o ambiente receptor. Essas leis também geralmente descrevem os princípios-chave de gerenciamento ambiental e a hierarquia de resíduos, com a evitar o desperdício e a reciclagem sendo a opção de gerenciamento preferida em comparação com o descarte.

O documento apresenta a informação de que não existem padrões nacionais aplicáveis ao uso de bio sólidos, no entanto, as diretrizes são referenciadas pela Norma Australiana AS 4454 (2003) aplicada para Compostos, Condicionadores de Solo e Adubo. Além disso, não existem manuais de melhores práticas ou especificações relacionadas aos bio sólidos. Portanto, os compostos regulados por cada um dos estados, varia.

5.1.1.4 Estados Unidos

A regulamentação americana sobre bio sólidos é uma das mais antigas, e tida, por muitos autores, como referência mundial. Ela foi estabelecida em 1993 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e pode ser encontrada no título 40 do Código de Regulamentações Federais, Parte 503, sob título "Padrões para o Uso ou Disposição de Lodo de Esgoto". Desde sua publicação inicial, foi emendada diversas vezes.

A legislação estabelece normas para o uso final ou disposição de bio sólidos tanto para aplicação em terra, quanto disposição superficial ou incineração. Para o uso no solo, são expostos limites de poluentes, requisitos e alternativas para redução de patógenos e atração de vetores. Além disso, classifica os bio sólidos e as respectivas restrições e usos.

É exigido que os bio sólidos sejam aplicados no solo na taxa agrônômica apropriada, que, de acordo com a USEPA (1993):

é a taxa de aplicação de lodo projetada para fornecer a quantidade de nitrogênio necessária pela cultura ou vegetação cultivada no solo. A taxa agrônômica depende do tipo de cultura, localização geográfica e características do solo. A assistência na elaboração da taxa agrônômica deve ser obtida de uma pessoa experiente, como o agente de extensão local ou o departamento de análise de solo da Universidade Estadual em cada estado.

5.1.2 Classificação dos bio sólidos

A legislação irlandesa classifica os bio sólidos como um produto pasteurizado, se submetido à um dos tratamentos aprovados expostos no documento, com a finalidade de

alcançar os padrões microbianos estabelecidos. Ou seja, embora não apresente nomenclaturas sobre as classificações, ela é baseada na qualidade microbiológica.

Enquanto na Austrália, de forma geral, a classificação dos biossólidos é baseada em dois fatores, ou seja, nas concentrações de contaminantes e no grau de estabilização, que reflete a qualidade microbiológica pós-tratamento. Em cada uma das legislações autônomas, referentes a cada uma das regiões, varia as nomenclaturas e subdivisões entre cada um desses fatores, bem como seus critérios.

Em resumo, no cenário australiano tem-se que em Nova Gales do Sul a concentração de contaminantes é subdividida em 5 categorias (A, B, C e D, E) e o grau de estabilização em três (A, B e C). Já em Queensland, nas Classes A, B ou C, tratando-se dos limites de contaminantes, e quanto à qualidade microbiológica, nas categorias A e B, a depender dos requisitos de redução de patógenos e vetores. Na Austrália do Sul e na Tasmânia, o grau de contaminantes é subdividido em duas categorias (A e B), assim como o grau de estabilização, que acarretam na classificação do biossólido em 1 ou 2.

Em Victoria, o grau de contaminante é subdividido em C1 ou C2, e para a obtenção da qualidade microbiológica, analisa-se o grau de tratamento, subdividido em T1, T2, T3. Os biossólidos de melhor qualidade são, então, obtidos por uma combinação dos graus de tratamento e contaminantes T1 e C1. Na Austrália Ocidental, para o grau de contaminante, subdivide-se nas Classes C1, C2, C3 e o grau de patógeno, em P1, P2, P3, P4. Por fim, no Território do Norte classifica-se os biossólidos pelo grau de estabilização, P1, P2, P3, P4 e níveis de contaminantes químicos, C1 e C2.

Em contrapartida, nos Estados Unidos, os biossólidos são divididos nas Classes A e B, fundamentadas em critérios microbiológicos, mais especificamente em termos de requisitos de redução de patógenos. E no Brasil, semelhantemente às legislações australianas, o biossólido é classificado pela resolução em Classe A ou Classe B, com base na qualidade microbiológica, a variar por critérios como a concentração de patógenos, e origem do processo de redução de patógenos, e em Classe 1 ou Classe 2, em critérios de substâncias químicas.

Através das informações acima, podemos observar que, os países têm abordagens distintas quanto à classificação dos biossólidos, enquanto alguns países priorizam a redução de patógenos, como a Irlanda e os Estados Unidos, outros consideram tanto os aspectos microbiológicos quanto os químicos na classificação dos biossólidos.

A análise permite concluir também a informação, exposta anteriormente, sobre a Austrália possuir uma das regulações mais restritas no mundo para o uso de biossólidos, uma

vez que dentre as legislações analisadas, é a que mais apresenta subdivisões das classificações, o que pode refletir nos usos e restrições. Mas, em termos gerais, a legislação brasileira apresenta-se semelhante à australiana, enquanto a irlandesa e americana se assemelham.

5.1.3 Limites de concentrações de poluentes regulados

Apresentadas as legislações referentes aos quatro países, é notório que a Austrália apresenta maior complexidade na avaliação, uma vez que existem sete regulamentações diferentes. Desta forma, visando a estruturação da análise comparativa a ser apresentada no próximo item, bem como uma discussão acerca dela, realizou-se uma análise das legislações australianas, para verificar os padrões das concentrações de poluentes e patógenos.

Portanto, quanto aos contaminantes químicos, através das informações expostas nas tabelas 2 à 8, que representam respectivamente, as concentrações máximas para os contaminantes, nas regiões de Nova Gales do Sul, Queensland, Austrália do Sul, Tasmânia, Victoria, Austrália Ocidental e o Território do Norte, estabeleceu-se as faixas de valores entre as concentrações, que compreendem o intervalo entre o menor e o maior valor apresentado dentre elas.

De acordo com informações do portal das diretrizes das regiões da Austrália o “Diretório de Meio Ambiente e Planejamento do Governo do Território da Capital Australiana considera o gerenciamento de bio-sólidos na Estratégia de Gerenciamento de Resíduos do ACT: Rumo a uma Canberra Sustentável 2011–2025.” Neste documento não foram encontrados limites das concentrações dos contaminantes, sendo portanto, descartado da análise.

Tabela 2 - Concentração máxima de contaminantes - Nova Gales do Sul.

Contaminante	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹
Arsênio	20	20	20	30
Cádmio	3	5	20	32
Cromo (total)	100	250	500	600
Cobre	100	375	2000	2000
Chumbo	150	150	420	500
Mercúrio	1	4	15	19
Níquel	60	125	270	300
Selênio	5	8	50	90
Zinco	200	700	2500	3500
DDT/ DDD/DDE	0.5	0.5	1	1

Aldrina	0.02	0.2	0.5	1
Dieldrina	0.02	0.2	0.5	1
Clordano	0.02	0.2	0.5	1
Heptacloro	0.02	0.2	0.5	1
HBC	0.02	0.2	0.5	1
Lindano	0.02	0.2	0.5	1
BHC	0.02	0.2	0.5	1
PCBs	0.3	0.3	1	1

Fonte: Adaptado de New South Wales (2000)

Notas:

¹Os valores são expressos com base no peso seco.

Tabela 3 - Concentração máxima de contaminantes - Queensland.

Característica de qualidade	Limites de contaminantes (massa seca) em mg/kg		
	Classe A	Classe B	Classe C
Arsênio	20	20	20
Cádmio	3	5	20
Cromo (total)	100	250	500
Cobre	150	375	2000
Chumbo	150	150	420
Mercúrio	1	4	15
Níquel	60	125	270
Selênio	5	8	50
Zinco	300	700	2500
PFAs ¹	M. R	M. R	M. R
Flúor orgânico total	M. R	M. R	M. R
DDT/ DDD/DDE	0.5	0.5	1
Aldrin	0.02	0.2	0.5
Dieldrina	0.02	0.2	0.5
Clordano	0.02	0.2	0.5
Heptacloro	0.02	0.2	0.5
HBC	0.02	0.2	0.5
Lindano	0.02	0.2	0.5
BHC	0.02	0.2	0.5
PCBs	não detectado ²	0.3	1

Fonte: Adaptado de Queensland (2020)

Notas:

¹Substâncias per e polifluor alquiladas; MR - Monitoramento requerido.

Tabela 4 - Concentração máxima de contaminantes - Austrália do Sul.

Contaminante	Classe A	Classe B
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹
Cádmio	1	20
Cromo VI	1	1
Cobre	100	2500

Zinco	200	2500
-------	-----	------

Fonte: Adaptado de South Australia (2020)

Notas:

¹Os valores são expressos com base no peso seco; ²Não detectado no limite de detecção de 0.1 kg/mg

Tabela 5 - Concentração máxima de contaminantes (mg/kg) - Vitória.

Contaminante	Classe C1	Classe C2
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹
Arsênio	20	60
Cádmio	1	10
Cromo ²	400	3000
Cobre	100 (150) ³	2000
Chumbo	300	500
Mercúrio	1	5
Níquel	60	270
Selênio	3	50
Zinco	200 (300) ³	2500
DDT e derivados	0.5	1
Pesticidas organoclorados*	0.05	0.5
PCBs	0.2	1

Fonte: Adaptado de Victoria (2004)

Nota:

¹Valores em peso seco

²Limite de Cromo (II) devido à expectativa de que esta será a forma dominante

³Limite de 150 mg/kg de cobre e 300 mg/kg de zinco para produtos de biossólidos compostados

*O limite de pesticidas organoclorados aplica-se individualmente a: dieldrina, aldrina, clordano, heptacloro (e o epóxido), hexaclorobenzeno e lindano.

Tabela 6 - Concentração máxima de contaminantes - Tasmânia.

Contaminante	Classe A	Classe B
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹
Arsênio	20	60
Cádmio	1	20
Cromo (total)	50	300
Cobre	100	2500
Chumbo	150	420
Mercúrio	1	15
Níquel	60	270
Zinco	200	2500

Fonte: Adaptado de Tasmânia (2020)

Nota:

¹Os valores são expressos com base no peso seco.

Tabela 7 - Concentração máxima de contaminantes - Austrália Ocidental.

Contaminante	Classe C1	Classe C2	Classe C3
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹	
Arsênio	20	60	
Cádmio	1	20	
Cromo (VI) ²	1	1	
Cobre	100 (150) ³	2500	
Chumbo	200	420	Não testado ou superior a classe C2
Mercúrio	1	15	
Níquel	60	270	
Selênio	3	50	
Zinco	200 (300) ³	2500	
Dieldrina	0.02	0.5	
Clordano	0.02	0.5	

Fonte: Adaptado de Western Australia (2012)

Notas: ¹Valores em peso seco

² Medida Nacional de Proteção Ambiental (Avaliação da Contaminação do Local) de 1999, Conselho Nacional de Proteção Ambiental. Note que o cromo (VI) é um agente oxidante forte e é improvável que esteja presente em biossólidos. No entanto, devido à sua toxicidade e à entrada de matéria-prima industrial nos biossólidos, pode ainda permanecer algum cromo (VI) na forma não reduzida se os parâmetros do processo não forem ótimos para uma redução completa, e por isso a análise para este contaminante continua sendo necessária.

³denota valores para produtos compostados usados para fins domésticos gerais, não para substituição de solo

Para o Território do Norte, os valores considerados foram os valores orientadores de contaminantes, utilizados quando as diretrizes dos Estados/Territórios não estiverem disponíveis (Austrália, 2004).

Tabela 8 - Concentração máxima de contaminantes - Território do Norte.

Contaminante	Classe C1	Classe C2
	uso irrestrito- diretrizes de concentração máxima de contaminantes no solo	se excedido, não deve ser utilizado
	(mg/kg) ¹	(mg/kg) ¹
Arsênio	20	60
Cádmio	1	20
Cromo (Cr III)	100 - 400	500 - 3000
Cobre	100 - 200	2500
Chumbo	150 - 300	420
Mercúrio	1	15
Níquel	60	270
Selênio	3	50
Zinco	200 - 250	2500
DDT/DDD/DDE	0.5	1
Outros pesticidas organoclorados	0.02- 0.05	0.5
PCB	0.05 - 0.3	0.5

Fonte: Adaptado de Australia (2004)

Nota: ¹Valores em peso seco

Embora a concentração dos contaminantes não seja o fator utilizado por todos os países da análise como critério para a classificação dos biossólidos, ela é unanimemente limitada em todas elas, podendo ser destacada como uma condição de uso. Na tabela 9, são apresentados os valores máximos compilados, referentes aos parâmetros químicos abordados nas legislações que restringem a aplicação dos biossólidos.

Tabela 9 - Comparativo dos parâmetros químicos regulados pelas legislações da Irlanda, Austrália, EUA e Brasil.

(continua)

Parâmetro	Brasil		Irlanda					Austrália				EUA	
	Biossólido		Classe 2			Solo		Biossólido				Carga acumulada e concentração	Taxa anual
	1	2	Taxa anual	Carga acumulada		Solo	Carga acumulada	A ou 1	B ou 2	C ou e 3	D		
	mg/kg	mg/kg	kg/ha/ano	AD	AND	mg/kg	kg/ha/ano	mg/kg				mg/kg	kg/ha/ano
Arsênio	41	75	2	20	41	-	-	20	20-60	20	30	41	2
Bário	1300	1300	13	130	260	-	-	-	-	-	-	-	-
Cádmio	39	85	1,9	19	39	1	0,05	1 - 3	1-20	20	32	39	1,9
Cromo III	-	-	-	-	-	-	-	100-400	500-3000	-	-	-	-
Cromo IV	-	3000	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
Cromo Total	1000	-	150	1500	3000	-	3,5	50-100	250-300	500	600	-	-
Chumbo	300	840	15	150	300	50	4	150-300	150-500	500	500	300	15
Cobre	1500	4300	75	750	1500	50	-	100-200	-	2000	2000	1500	75
Mercúrio	17	57	0,85	8,5	17	1	0,1	1	1-15	15-19	19	17	0,85
Molibdênio	50	75	0,65	6,5	13	-	-	-	-	-	-	-	-
Níquel	420	420	21	210	420	30	3	60	125-270	270	300	420	21
Selênio	36	100	5	50	100	-	-	3-5	8-50	50-90	90	100	5
Zinco	2800	7500	140	1400	2800	150	7,5	200-300	700-2500	2500-2500	3500	2800	140

Tabela 9 - Comparativo dos parâmetros químicos regulados pelas legislações da Irlanda, Austrália, EUA e Brasil.

(conclusão)

Parâmetro	Brasil				Irlanda		Austrália				EUA		
	Biossólido		Classe 2		Solo		Biossólido				Carga acumulada e concentração	Taxa anual	
	1	2	Taxa anual	Carga acumulada	Solo	Carga acumulada	A ou 1	B ou 2	C ou e 3	D			
PFAs ¹	-	-	-	-	-	-	-	M. N	M. N	M. N	-	-	-
Total de flúor orgânico	-	-	-	-	-	-	-	M. N	M. N	M. N	-	-	-
DDT ²	-	-	-	-	-	-	-	0,5	1	1	1	-	-
Pesticidas organoclorados	-	-	-	-	-	-	-	0,02-0,05	0,2-0,5	0,5	1	-	-
PCBs ³	-	-	-	-	-	-	-	0,05-0,3	0,3-1	0,3-1	1	-	-

Fonte: Adaptado de Queensland (2020) ; New South Wales (2000) South Australia (2020); Tasmânia (2020); Victoria (2004); Western Australia (2012) e Austrália (2004); Adaptado de USEPA, 1993; CONAMA (2020); Government of Ireland (2004).

Nota:

¹PFAs -perfluoroalquil e polifluoroalquil;

²DDT = diclorodifeniltricloroetano;

³PCBs - bifenilos policlorados;

AD - Solos de áreas degradadas;

AND - Solos de áreas não degradadas;

M. N- Monitoramento necessário.

É visível que as abordagens são distintas. Podemos observar que, mais uma vez, a legislação da Austrália destaca-se na regulação dos poluentes. Nela são estabelecidos limites para até 20 contaminantes, como por exemplo em Queensland, que segrega os compostos químicos que pertencem à categoria dos organoclorados, enquanto no Brasil são limitados 11 poluentes, Estados Unidos, 9 e na Irlanda, apenas 6.

Essa diferença pode, possivelmente ser explicada pela informação exposta pela legislação da Austrália do Sul (SOUTH AUSTRALIA, 2020), que justifica a exclusão da análise de alguns elementos como Arsênio, Bário, Chumbo, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, entre outros, devido às concentrações médias desses compostos no solo agrícola australiano, encontrados nos biossólidos utilizados no Programa Nacional de Pesquisa de Biossólidos. Ou seja, trazendo o argumento para um contexto geral, a quantidade de compostos adicionados por meio desse produto não seria suficiente para elevar os níveis de contaminação a um ponto que representasse uma preocupação significativa em relação aos níveis naturais já presentes no solo, o que reflete na limitação de componentes específicos.

Outra característica distinta é na classe dos poluentes abordados por cada um dos países. No Brasil, limitam-se apenas os metais pesados, da mesma forma realizada nos Estados Unidos e Irlanda, enquanto a Austrália limita também os compostos químicos Aldrina, Dieldrina Clordano, Heptacloro, HCB (Hexaclorobenzeno), Lindano (também conhecido como BHC) e PCBs (bifenilos policlorados) que pertencem à categoria dos organoclorados.

Esses componentes representam compostos orgânicos utilizados na produção de pesticidas, usados no passado no controle de insetos e de doenças agrícola, desde a década de 1940, mas que foram banidos pela Convenção de Estocolmo, em decorrência dos graves problemas à saúde e ao meio ambiente que pode causar (Silva e Moreira, 2022; Santos, 2015). Entretanto, mesmo com o banimento, Santos (2015) afirma que: “traços destes compostos podem ser encontrados em diversas matrizes ambientais, entre elas, o lodo de esgoto”. E no Brasil, estudos realizados no Paraná comprovaram a presença do composto no lodo de esgoto.

Embora as concentrações obtidas pelo estudo tenham sido inferiores à 0,10 mg/Kg (Filippi, 2022), Santos (2015) defende a necessidade da quantificação dos contaminantes orgânicos passíveis de serem encontrados na composição do lodo, de forma a eliminar os riscos de contaminação ambiental provenientes dessa atividade, como os registros de eventos ocorridos ao redor do mundo na contaminação nas águas do oceano, que fracassou a reprodução de peixes no Texas, e a contaminação de golfinhos, ou até mesmo a presença

desse composto em amostras de leite materno, em tecido adiposo de humanos, além da sugestão de causas de câncer quando observada a ocorrência em populações que ingeriram águas contaminadas.

Além desses, no Brasil, por volta dos anos 2000, resíduos de alguns compostos foram encontrados em amostras de sangue de pessoas que trabalhavam e/ou viviam em uma região na qual, 50 anos antes, funcionava uma indústria de pesticida, e que, infelizmente, acabou atingindo o solo e a vegetação (Flores *et al.* 2004). Portanto, tendo o conhecimento dos riscos que podem estar associados, o monitoramento dos compostos organoclorados poderia ser inserido na resolução CONAMA 498/2020 como via de mitigação.

Através da tabela 9, e como forma de interpretação dela, podemos pontuar diferenças no conteúdo de cada uma das legislações. A brasileira aborda a aplicação do biossólido no solo, de maneira geral, e que inclui a agricultura, assim como a americana e as australianas, enquanto a irlandesa restringe-se à agricultura.

Em suma, a CONAMA 498/2020 retrata a concentração máxima permitida de substâncias químicas no biossólido a ser destinado para uso em solos, de acordo com cada uma das duas classes. Em seguida, expõe outro critério restritivo para os biossólidos de Classe 2: a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas.

A legislação Irlandesa estabelece que o lodo não deve ser aplicado em solos onde a concentração de um ou mais metais pesados exceda os valores especificados na tabela 9, na coluna “Solo” sob “Irlanda”. E também, estabelece os valores limites para quantidades de metais pesados que podem ser adicionados anualmente ao solo agrícola, com base em uma média de dez anos, apresentada na coluna “Carga cumulativa”, expressa em kg/ha/ano.

Já nos Estados Unidos, a legislação estabelece, através da seção § 503.13 do documento, quatro condições para aplicação de lodo no solo. A primeira é a concentração máxima permitida de poluentes presentes no lodo, em mg/kg, a segunda, com ênfase na aplicação agrícola, refere-se ao atendimento da taxa de carga cumulativa de poluentes, dada em kg/hectares ou, à concentração máxima de cada poluente no lodo de esgoto, em mg/kg de matéria seca. Ambos parâmetros possuem os mesmos valores para todos os metais pesados limitados, diferenciando apenas a unidade de medida de cada uma delas. E por fim, o último critério é que, o produto da concentração de cada poluente e da taxa anual de aplicação de lodo de esgoto não deve ultrapassar a taxa anual de carga de poluente, que é a quantidade máxima de um poluente que pode ser aplicada a uma unidade de área de terra durante um período de 365 dias.

Na Austrália, em geral, define-se a concentração para os bio sólidos e para os solos. Como exemplo, a legislação da Austrália do Sul que regula a carga anual de contaminantes e as concentrações máximas permitidas, bem como a carga acumulada de contaminantes.

Em critérios de valor, a legislação brasileira apresenta as mesmas concentrações do que as apresentadas na americana, o que é questionado por alguns autores, conforme cita Abreu et al. (2019), uma vez que foram alcançados em condições ambientais diferentes. E a australiana, apresenta-se como a mais rigorosa, quando comparada com a do Brasil, uma vez que, comparando as concentrações permitidas para os bio sólidos de melhor classe, ou seja, em ambos países, os valores são bem distintos.

5.1.3 Parâmetros microbiológicos regulado

O segundo parâmetro abordado nesta análise comparativa é a qualidade microbiológica dos bio sólidos. Para tal, conforme realizado anteriormente, agrupou-se, em formas de tabela, os valores estabelecidos nas legislações, e eles são apresentados na tabela 11.

Para as concentrações de patógenos da Austrália, os resultados foram considerados de acordo com os mesmo critérios dos parâmetros químicos. As informações extraídas de cada uma das legislações foram agrupadas, e encontram-se na tabela 10. Portanto, nos parâmetros referentes à Austrália, serão apresentados os dados unificados representados pelos intervalos entre os valores mais baixos e mais altos das concentrações.

Tabela 10 - Padrões microbiológicos de acordo com as legislações da Austrália.

Parâmetro/ Classe	Nova Gales do Sul	Queens land	Austrália do Sul		Tasmânia		Victoria			Austrália Ocidental			Território do Norte		
	A		A	B	A	B	T1	T2	T3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Escherichia coli (NMP/g)	<100	<100	<100	<1000	<100	<2x10 ⁶	<100	<1000	<2x10 ⁶	<100	<1000	<2x10 ⁶	<100	<1000	<2x 10 ⁶
Coliforme Fecal (NMP/g)	<1000	<1000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Salmonella</i> sp. (/50 gST)	-	-	< 1	-	-	-	< 1	<10	**	-	-	-	< 1	<10	-
Ovos viáveis de helmintos	<1 (/4 g)	<1 (/ 50g)	<1 (/ 50g)	-	<1 (/ 50g)	-	-	<1 ¹ (/ 10g)	-	<1 (/ 50g)	<1 (/ 50g)	<1	-	-	-
Vírus	<1 (UFP/4 g)	<1 (/ 50g)	<1 (/ 50g)	-	< 1 (UFP/50g)	-	≤1 (UFP/100g)	< 2 (UFP/10g)	**	-	-	-	< 1 (UFP/100g)	-	-
Colifagos (UFC/10 g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<10	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Queensland (2020) ; New South Wales (2000); South Australia (2020); Tasmânia (2020); Victoria (2004); Western Australia (2012) e Austrália (2004).

Nota:

¹E remoção de 2 logs;

** Redução de 1 log.

Tabela 11 - Parâmetros microbiológicos máximos permitidos pelas legislações do Brasil, Irlanda, Austrália e EUA.

Parâmetro/ Classe	Brasil		Irlanda	Austrália			EUA	
	A	B		A, P1 ou T1	B, P2 ou T2	P3 ou T3	A	B
Coliforme fecal (NMP/gST)	-	-	$< 10^3$	$< 10^3$	$< 10^3$	-	$< 10^3$	$< 2 \times 10^6$
Escherichia coli (NMP/gST)	$\leq 10^3$	$\leq 10^6$	-	$< 10^2$	$< 10^3 - 2 \times 10^6$	$< 2 \times 10^6$	-	-
<i>Salmonella</i> sp. (NMP/4gST)	-	-	< 3	< 1	< 10	**	< 3	-
Ovos viáveis de helmintos	$< 1^1$ (NMP/gST)	-	-	< 1 (/4g ou /10g ou 50g)	$< 1^2$ (/ 50g)	< 1 (/ 50g)	< 1 (UFP/ 4gST)	-
Vírus	-	-	-	≤ 1 (UFP/4g ou /50g ou /100g)	$< 2^2$ (UFP/10g)	-	< 1 (UFP/ 4gST)	-
Colifagos (UFC/10 g)	-	-	-	< 10	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de CONAMA (2020); Timoney (1998); Queensland (2020) ; New South Wales (2000); South Australia (2020); Tasmânia (2020); Victoria (2004); Western Australia (2012) e Austrália (2004) e USEPA (1993).

Nota:

¹Exposto nos requisitos para a alternativas 3 e 4 da obtenção de biossólidos Classe A;

²Remoção de 2 logs (Legislação de Victoria).

**Remoção de 1 log (Legislação de Victoria);

A análise dos valores apresentados revela divergências nos controles de qualidade dos biossólidos. Para a Classe A, a norma dos Estados Unidos requer o cumprimento de limites para coliformes fecais ou *Salmonella sp.*, enquanto a regulamentação irlandesa exige o monitoramento de ambos. Já dentre as regulamentações da Austrália, até quatro parâmetros são controlados simultaneamente, como é o caso do estado de Nova Gales do Sul, que regula *Escherichia coli*, ovos de helmintos (*Ascaris sp.* e *Taenia sp.*), vírus entéricos e coliformes fecais.

Conforme mencionado anteriormente, a Resolução CONAMA 498/2020 classifica os biossólidos em duas categorias distintas com base na qualidade microbiológica. Biossólidos são classificados como Classe A se atenderem ao limite máximo de 10^3 NMP/gST de *Escherichia coli* e forem provenientes de um dos processos de redução de patógenos listados na resolução. Por outro lado, para serem classificados como Classe B, as exigências não são simultâneas, ou seja, podem atender ao limite máximo de 10^6 NMP/gST de *Escherichia coli* ou serem provenientes de um dos processos de redução de patógenos.

Os processos de redução de patógenos são detalhados na legislação, com requisitos específicos para cada categoria. Para os biossólidos Classe A, a legislação impõe a necessidade de "redução adicional de patógenos", enquanto para os biossólidos Classe B, é exigida uma "redução significativa de patógenos". Um requisito específico para biossólidos Classe A estabelece que "a caracterização de ovos viáveis de helmintos deve ser realizada no momento da formação do lote de biossólido e sua presença deve ser menor que 1 (um) ovo viável de helmintos (nematoides intestinais humanos) por grama de sólido total (g-1 de ST)" (CONAMA, 2020), limitando essa alternativa à aplicação dos biossólidos em lote.

São exemplificados pela CONAMA 498/2020 a compostagem confinada ou em leiras aeradas, a secagem térmica direta ou indireta, o tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto sanitário, digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, processos de irradiação com raios beta e processos de pasteurização, para processo de redução adicional de patógenos. Para os de redução significativa de patógenos, a digestão anaeróbica, secagem em leitos de areia ou em bacias, digestão anaeróbica, compostagem e pasteurização. Ressalta-se que, para ambas as classes é permitido o emprego de processos não especificados no documento, desde que comprovada a equivalência a um processo de redução significativa de patógenos e perante aprovação do órgão ambiental competente.

O mesmo critério é seguido pela legislação americana. Para biossólidos Classe A, são estabelecidos limites para coliformes fecais ou *Salmonella sp.*, além de requisitos para

redução da atração de vetores. Para biossólidos Classe B, deve-se apresentar concentrações inferiores a 2×10^6 NMP/gST de *Escherichia coli*, ou ser submetido a um dos processos para redução significativa de patógenos.

Dentre os processos para redução significativa de patógenos, a Norma 503 exemplifica digestão aeróbia, compostagem, digestão anaeróbica, secagem ao ar e estabilização com cal, e como processos para redução significativa de patógenos: compostagem, secagem térmica, tratamento térmico, digestão aeróbia termofílica, irradiação por raios beta, irradiação por raios gama, pasteurização (USEPA, 1993).

O Código de Boas Práticas para Biossólidos na Agricultura da Irlanda, embora não subdivida os biossólidos em classes, estabelece que estes devem ser submetidos a pelo menos um dos seguintes tratamentos para garantir o atendimento aos padrões microbiológicos de coliformes fecais e *Salmonella* sp.: digestão anaeróbica mesofílica com pré ou pós-sanitização, digestão anaeróbica termofílica, digestão aeróbia termofílica, compostagem em leiras ou pilhas aeradas, estabilização alcalina ou secagem térmica. Após isso, o produto é classificado como pasteurizado (TIMONEY, 1998).

Em contraste com as legislações dos Estados Unidos, Brasil e Irlanda, Nova Gales do Sul estabelece limites de concentração apenas para biossólidos Classe A. Para biossólidos Classe B, é necessário que o material atenda a qualquer um dos requisitos de redução de patógenos e redução da atração de vetores especificados em uma tabela do documento, como digestão anaeróbica, compostagem, estabilização com cal, entre outros

Uma semelhança entre todos os países é o monitoramento de coliformes fecais, especificados no Brasil e Austrália como *Escherichia coli*. Segundo Bastos, Bevilacqua e Mara (2013), esses são considerados pela legislação americana como indicadores da ausência de *Salmonella* sp., porém não são indicadores confiáveis da ausência de vírus entéricos e ovos de helmintos.

No Brasil, um estudo realizado no Rio de Janeiro em 2000 detectou a presença simultânea de *Salmonella* sp. e *Escherichia coli* nas amostras analisadas. A Figura 10, extraída desse estudo, apresenta os patógenos encontrados tanto nas amostras quanto no lodo submetido ao processo de tratamento com cal. Observa-se a presença de *Salmonella* sp. e concentração de *Escherichia coli*. no lodo sem tratamento com cal, conforme ilustrado no estudo.

Figura 10 - Concentração de patógenos nas amostras utilizadas no experimento do Rio de Janeiro.

AMOSTRA	PENHA (RJ)						ILHA (RJ)					
	Sem cal			Com cal			Sem cal			Com cal		
	CT	CF	S	C T	C F	S	CT	CF	S	C T	C F	S
01	$3,5 \times 10^6$	$2,2 \times 10^5$	P	A	A	A	$1,3 \times 10^6$	$5,0 \times 10^5$	P	A	A	A
02	$8,0 \times 10^5$	$3,0 \times 10^5$	P	A	A	A	$1,1 \times 10^6$	$3,0 \times 10^3$	P	A	A	A
03	$3,0 \times 10^5$	$5,0 \times 10^5$	P	A	A	A	$2,1 \times 10^6$	$2,0 \times 10^5$	P	A	A	A

CT = *Coliforme Total*. CF = *Coliforme Fecal*. S = *Salmonela*.
P = Presença. A = Ausência.

Fonte: Chagas (2000)

No contexto de vírus entéricos, há questionamentos, pois eles são monitorados em outros países e já foram detectados em esgoto no Brasil em diversos estudos, conforme mencionado por Barrella (2008). Esses vírus abrangem todos os grupos presentes no trato gastrointestinal humano e são transmitidos por via fecal-oral. No solo, podem migrar para camadas mais profundas e alcançar águas subterrâneas. Podem causar desde infecções assintomáticas até condições mais graves como paralisias, anomalias cardíacas, meningite asséptica, encefalites, hepatites, diarreias e outras enfermidades em indivíduos suscetíveis (Tavares, Cardoso e Brito, 2005 citados por Wyn-Jones & Sellwood, 2001; Leclerc *et al.*, 2002; Theron & Cloete, 2002; Bosch, 1998).

Da mesma forma, questiona-se a ausência de controle de ovos de helmintos, que Leite (2015) associa, juntamente com cistos de protozoários e bactérias, aos maiores riscos à saúde humana e animal, devido à sua capacidade de resistência a uma ampla variedade de condições físicas e químicas, podendo sobreviver por vários anos no solo. Andreoli *et al.*, (2001) expõe que, dada a resistência deste patógeno, uma vez realizado o seu controle, os demais estarão automaticamente em níveis admissíveis, não apresentando riscos aos usuários do produto e ao ambiente

Ainda sobre o questionamento levantado, cita-se o estudo que apresenta o tratamento do lodo pela adição de cal, que aumenta o pH do meio, causando a inativação dos ovos de helmintos. Neste estudo, Rossmann *et al.* (2014) concluiu que, a caleação realizada por 72 horas promoveu a inativação de 99,32% dos ovos de helmintos, alcançando a contagem de ovos de helmintos próximo a zero. Entretanto, embora tenha alcançado o valor aceitável neste estudo, ou seja, nulo perante a presença dos ovos, e represente uma redução, essa aplicação seria viável se fossem estabelecidos padrões aceitáveis para a caracterização do lodo. Pois

nada adianta alcançar eficiências altas de remoção, se a concentração no lodo for tão acentuada a ponto de, mesmo após o tratamento, oferecer riscos à saúde.

De forma geral, através da análise, nota-se muita semelhança entre as estruturas das legislações nos quesitos de padrões microbiológicos e requisitos operacionais, especialmente entre as legislações do Brasil e dos Estados Unidos.

5.1.4 Usos e restrições

Por fim, o último critério constituinte desta análise comparativa trata dos usos e restrições. No Brasil, é proibida a importação de lodo de esgoto de outros países e vedada a aplicação em solo de lodo de estação de tratamento de efluentes de estabelecimentos de serviços de saúde, de portos e aeroportos; lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma UGL; e lodo classificado como perigoso de acordo com as normas brasileiras vigentes (CONAMA, 2020). Além disso, a resolução expõe os usos permitidos e respectivas restrições, bem como tempo entre a aplicação do bio sólido e o cultivo ou colheita dos produtos alimentícios, a partir da classificação dos bio sólidos.

Para o bio sólido Classe A, não existem restrições para produtos alimentícios que não têm contato com o solo, ou os que não são consumidos crus e produtos não alimentícios, em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas. Já para o cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo e pastagens e forrageiras, a restrição consiste no período de tempo de 1 mês para, respectivamente, a aplicação do bio sólido e a colheita do alimento, e de colheita de forrageiras e do pastejo.

Para bio sólidos Classe B, a aplicação é proibida para o cultivo de alimentos que possam ser consumidos crus. Estipula-se também, o prazo mínimo de 6 meses antes do cultivo de alimentos que possam ser consumidos crus, com bio sólido Classe A ou sem uso de bio sólido, em áreas onde previamente tenha sido aplicado o bio sólido Classe B. Além do período de 4 meses entre colheita de alimentos que não sejam consumidos crus, não alimentícios, e forrageiras, e 2 meses para o pastejo. Em árvores frutíferas, a aplicação é autorizada a ser realizada após a colheita.

Na Irlanda, o Código segrega a aplicação quanto às culturas que podem receber o bio sólido durante o crescimento e para a manutenção, ou seja, os que podem ser utilizados como fertilizantes em culturas em crescimento, sendo eles cereais, colza, gramíneas (tanto pastagens permanentes quanto silagem) e florestas, e aqueles que podem ser aplicados ao solo

antes do plantio, como cereais, colza, gramíneas (tanto pastagens permanentes quanto silagem), beterraba forrageira e florestas (com exceção das plantações florestais em áreas montanhosas).

Nos Estados Unidos a norma não proíbe, mas não estabelece critérios para a utilização de lodo gerado industrial, lodo de esgoto perigoso, com alta concentração de PCB, entre outros excluídos na seção 503.6 do documento. Também não restringe a aplicação de biossólidos Classe A, entretanto, submete os biossólidos Classe B a uma série de restrições quanto aos locais de aplicação, e os períodos para a colheita. Em culturas de produtos cujas partes colhidas entram em contato com a mistura de lodo de esgoto/ solo, mas estão totalmente acima da superfície do solo, restringe-se a colheita por 14 meses após a aplicação.

Quando a cultura for de alimentos cujas partes colhidas estão abaixo da superfície do solo, esse prazo estende-se para 20 meses para situações onde o lodo de esgoto permanece na superfície do solo por quatro meses ou mais antes de ser incorporado ao solo. Se essa permanência do lodo no solo for inferior a 4 meses, a cultura não deve ser colhida por 38 meses. Já para culturas alimentares, culturas forrageiras e culturas tuberosas, é estabelecido o prazo de 30 dias para a colheita. Quanto ao pastoreio são exigidos 30 dias para a pastagem de animais, e acesso público, em terras com alto potencial de exposição pública, deve ser restrito por um ano após a aplicação do lodo de esgoto, enquanto em terras com baixo potencial restrição de 30 dias.

Dentre as legislações da Austrália, são apresentados os usos e restrições, bem como o período de tempo entre a aplicação de biossólidos e a execução de atividades a serem exercidas, como colheita e acesso público. Na da Tasmânia o uso e restrição é estabelecido pela classificação do contaminante e da estabilização, ou seja, tem como critério parâmetros químicos e microbiológicos. Nela, são permitidos biossólidos Classe 1 em jardim doméstico e paisagismo urbano, enquanto Classe 2 em reabilitação de locais, agricultura, silvicultura e compostagem.

Em Victoria, os biossólidos de mais alta qualidade, ou seja, obtidos pela combinação dos graus de tratamento e contaminante T1 e C1, têm uso irrestrito, e podem ser aplicados em áreas residenciais e no cultivo de alimentos consumidos crus. Já os biossólidos de qualidade inferior, que contemplam graus C2, T2 e T3, têm usos restritos com requisitos para acesso público aos locais de aplicação, períodos de retenção para animais ou culturas alimentares humanas, silvicultura, reabilitação de terras. Para os usos restritos, a legislação exige Planos

de Melhoria Ambiental como forma de gerenciamento visando à proteção do meio ambiente, saúde pública e agricultura.

Intuitivamente, e como comprovado pelas informações expostas, a aplicação de biossólidos de melhores classes, de forma unânime, têm sua flexibilidade proporcional à sua qualidade, ou seja, quanto melhor a qualidade do biossólido, menores são as restrições para a sua aplicação. Outro ponto em comum são as restrições temporais, que visam reduzir os riscos de contaminação.

5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BIOSSÓLIDOS E ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS CRITÉRIOS OPERACIONAIS

Como visto anteriormente, a CONAMA 498/2020, que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, apresenta as alternativas para a obtenção de biossólidos por processos de redução adicional de patógenos e processos de redução significativa de patógenos. Através de sua análise, pode-se concluir que, embora ambos os processos objetivem a redução da carga patogênica, eles possuem diferenças relacionadas aos critérios e ao rigor na execução.

Os processos de redução adicional de patógenos, dos quais podem originar biossólidos Classe A, ou seja, biossólidos de qualidade superior, possuem critérios mais rigorosos do que os processos para a obtenção de biossólidos Classe B, de redução significativa de patógenos. Esse argumento pode ser fundamentado no valor regulado pela legislação para cada uma das classes. Quando comparados, os padrões da Classe A são mais restritivos quando comparados com biossólidos Classe B, como a concentração de *E. coli* permitida. Dessa forma, pode-se assumir que originam de tratamentos mais intensos, ou que englobam técnicas mais avançadas e dessa forma asseguram uma redução ainda maior da carga patogênica, o que resulta em um material de nível mais elevado de segurança e qualidade.

Visando a comprovação dessas informações e a real segurança do biossólido produzido pelos critérios e requisitos expostos na resolução CONAMA 498/2020, e buscando responder os questionamentos feitos no item anterior acerca da ausência do monitoramento de, *Salmonella* sp., ovos de helmintos e vírus entéricos, na tabela 12 abaixo são apresentados os resultados encontrados para os processos de redução adicional de patógenos, ou seja, para a obtenção de biossólidos Classe A, e na tabela 13, os processos de redução significativa de patógenos para obtenção de biossólidos Classe B.

Tabela 12 - Eficiência dos processos de redução adicional de patógenos.

(continua)

Tratamento	Parâmetros operacionais							Parâmetros biológicos								Referência		
	Período		Temperatura (°C)		Dosagem mínima (megarad)		Teor de água (%)			Coliformes termotolerantes (NMP/gST)		Salmonella sp. (NMP/gST)		Ovos viáveis de helmintos (ovos/g)			Vírus (UFC/g)	
	Est.	Leg.	Est.	Leg.	Est.	Leg.	E	S	L	E	S	E	S	E	S		E	S
Compostagem	82 d	-	62-68	-	-	-	-	-	-	2,5x10 ³	A	A	A	0,27	0,05*	-	-	Leite (2015)
	21 d	15 d	55-60	>55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	13	-	-	Andreoli <i>et al.</i> (2001)
	21 d	-	50-55	-	-	-	-	-	-	7,9x10 ⁴	1,3x10 ³	P	A	0,15	<0,1	-	-	Gantzer (2001)
	28 d	-	55	-	-	-	-	-	-	6,6x10 ⁷	2,0x10 ²	-	-	1,5	<1	2,7	A	Guzmán <i>et al.</i> (2007)
Secagem térmica	-	-	121	>80	-	-	n.a	n.a	10	1,3x10 ⁷	<2	A	A	A	A	-	-	Almeida <i>et al.</i> (2006)
	-	-	108	-	-	77,8	5,7	-	-	5,0x10 ⁵	<10	P	A	0,95	<0,1	-	-	Gantzer (2001)
Digestão aeróbia	11,6d	-	60	-	-	-	-	-	-	1,2x10 ⁶	A	P	A	-	-	-	-	Lloret <i>et al.</i> (2012)
	4 h	10 d	58,7	55 -60	-	-	-	-	-	1,4x10 ⁶	47	-	-	-	-	25,4	<0,1*	Carrington <i>et al.</i> (1991)
Processos de irradiação	-	-	n.a	-	-	-	-	-	-	2,5x10 ⁷	3,6x10 ²	6x10 ²	3	-	-	-	-	Al-Ghoniaiem <i>et al.</i> (2010)
	-	-	n.a	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-	-	-	-	
	-	-	n.a	20	0,5	1	-	-	-	-	-	-	-	297	0	-	-	Souza <i>et al.</i> (2011)
	-	-	22	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	2000	1,7- 12,8	-	-	Melmed e Comninos (1979)
	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-3000	6,8 - 35,7	-	-	

Tabela 12 - Eficiência dos processos de redução adicional de patógenos.

(conclusão)

Tratamento	Parâmetros operacionais								Parâmetros biológicos								Referência	
	Período		Temperatura (°C)		Dosagem mínima (megarad)		Teor de água (%)		Coliformes termotolerantes (NMP/gST)		<i>Salmonella sp.</i> (NMP/gST)		Ovos viáveis de helmintos (ovos/g)		Vírus (UFC/g)			
	Est.	Leg.	Est.	Leg.	Est.	Leg.	E	S	L	E	S	E	S	E	S	E		S
Processos de pasteurização	90 m		60		-	-	-	-	-	3,2x10 ⁸	1x10 ³	-	-	-	-	-	-	Bonjoch e Blanch (2009)
	60 m		80		-	-	-	-	-	3,2x10 ⁸	182	-	-	-	-	-	-	
	30 m	30 m	70	> 70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	A	-	-	Keller <i>et al.</i> (2004)
					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17 ²	<0,1 ²	
		30 m		70		-	-	-	-	-	-	0,01 ¹	A	-	-	-	-	Pike, Carrington e Harman (1988)
						-	-	-	-	-	-	22 ¹	P	-	-	-	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Legenda: E- valores de entrada (pré- tratamento); S- valores de saída (pós-tratamento); L- legislação; A- ausente ; P- presente ; n.a - não apresentado; d - dias; h - horas; m- min.

Nota:

¹Valor médio dos lotes do experimento, a máxima foi 0,15 e alguns 0;²Valores em NMP/ml;

Para os tratamentos realizados pela compostagem, todas as pesquisas levantadas apresentadas na tabela utilizaram o método de leiras. Gantzer (2001) obteve os resultados por leira aerada, utilizando serragem juntamente com o lodo, assim como Leite (2015), mas que misturou o lodo com material estruturante e Guzmán et al. (2007), que utilizou na mistura resíduos vegetais e material vegetal inerte recuperado após a triagem mecânica na mesma planta. Já Andreoli (2001) utilizou as leiras revolvidas mecanicamente, e a mistura de lodo com resíduos de podas de árvores.

Para os coliformes termotolerantes, a eficiência do tratamento foi positiva nos resultados de Guzmán et al. (2007), com redução para níveis toleráveis pela legislação, assim como o de Leite (2015), que alcançou temperaturas mais elevadas e um período de tempo mais longo. O mesmo não ocorreu no de Gantzer (2001), que obteve temperaturas mais baixas, sendo a máxima equivalente à mínima exigida, resultando em uma redução da *E. coli* para $1,3 \times 10^3$ NMP/gST, um valor ligeiramente acima do permitido pela legislação, que é de 10^3 NMP/gST.

Quanto à *Salmonella sp.*, presente no início do tratamento de Gantzer (2001), foi eliminada. Ou seja, as mesmas condições que ainda mantiveram a concentração de bactérias entéricas acima do aceitável extinguíram a *Salmonella sp.*. O mesmo ocorreu com os ovos viáveis de helminto, que, embora não tivessem resultado nulo neste estudo, chegaram a valores próximos ao não detectável.

Pela análise dos dados da tabela 12, o tratamento foi eficaz na eliminação dos ovos de helmintos, destacando-se os resultados de Andreoli *et al.* (2001), que alcançaram a eliminação total em períodos diferentes para cada uma das leiras. Enquanto uma delas, com 21 dias de tratamento sob mesmas temperaturas, alcançou valor nulo para ovos de helmintos, a outra ainda possuía 13 ovos, eliminados apenas após 42 dias. A eliminação dos vírus entéricos foi bem sucedida com a temperatura mínima de 55°C (Guzmán *et al.*, 2007).

Para a secagem térmica, em ambos os estudos apresentados, a temperatura mínima de 80°C foi superada. Embora Almeida *et al.* (2006) não tenha especificado o teor de água alcançado, a eficiência do tratamento foi comprovada, resultando em uma redução significativa na concentração de coliformes termotolerantes para níveis quase não detectáveis. De forma semelhante, a pesquisa de Gantzer (2001) demonstrou a eliminação total de *Salmonella sp.* e uma redução quase total nos ovos de helmintos. Para análise dos vírus entéricos não foram encontrados estudos.

Quanto ao tratamento térmico, nenhum estudo que aborde o lodo líquido e os critérios estabelecidos pela CONAMA 498/2020, como a temperatura de 180°C por 30 minutos, foi encontrado. A baixa imersão de pesquisas sobre o tema pode ser atribuída ao elevado custo operacional comparado com outras opções de tratamento de lodo (David, 2002).

A digestão aeróbia termofílica demonstrou-se muito eficiente na redução dos patógenos, até mesmo no experimento relatado por Carrington *et al.* (1991) cujo período foi inferior aos 10 dias, conforme critério operacional da legislação. Este estudo alcançou a concentração de coliforme fecal aceitável, eliminou os ovos de helmintos e resultou em baixo valor de vírus entérico.

Assim como o processo de secagem térmica, para o tratamento do lodo por irradiação não foram encontrados estudos de casos que comprovam os efeitos sob os vírus entéricos, mas dados encontrados na literatura relataram uma dose de 0,25 megarad para inativação de vírus em lodo de esgoto (Chang,1997). As três referências apresentadas utilizaram a irradiação com raios gama, mas ressalta-se que no estudo de Al-Ghoniaiem *et al.* (2010) e Souza *et al.* (2011) as temperaturas não foram apresentadas e as dosagem mínima de irradiação foram inferiores à 1 megarad.

Mesmo com isso, os resultados encontrados satisfizeram a concentração de coliformes fecais e da higienização dos outros patógenos. Já no de Melmed e Comninos (1979), que apresenta os resultados em uma faixa de valores, ocorreu um fato interessante. O produto obtido na irradiação de menor intensidade, 0,5 megarad apresentou melhores condições patogênicas do que os obtidos pela de 1 megarad. Ou seja, a irradiação em maiores dosagens não implicou na melhor desinfecção.

Por fim, a pasteurização atingiu a concentração tolerada para coliformes fecais conforme estabelecido pela Resolução CONAMA 498/2020, tanto quando o lodo foi submetido a temperaturas de 60°C por 90 minutos quanto a 80°C por 60 minutos. O estudo de Keller *et al.* (2004), que seguiu os critérios precisos da legislação (30 minutos a 70°C), foi capaz de eliminar completamente os 8 ovos viáveis de helmintos por grama de sólido.

Além disso, o estudo de Pike, Carrington e Harman (1988) apresentou resultados em NMP/ml para *Salmonella sp.*, alcançando a eliminação total em uma amostra que inicialmente tinha uma baixa concentração de 0,01 NMP/ml, embora não tenha especificado a concentração final após o pré-tratamento de 22 NMP/ml. Portanto, não é possível concluir claramente a eficiência da pasteurização na eliminação de *Salmonella sp.*, pois não foram encontrados estudos que demonstrassem uma redução significativa. Para os vírus entéricos, os

valores estavam na mesma faixa dos demais processos apresentados, sendo considerada, então, a pasteurização eficiente na sua remoção.

Tabela 13 - Eficiência dos processos de redução significativa de patógenos.

(continua)

Tratamento	Parâmetros operacionais									Parâmetros biológicos								Referência
	Período mínimo		Temperatura (°C)		Teor de sólidos mínimo (%)		pH			Coliformes termotolerantes (NMP/gST)		Salmonella sp. (NMP/ST)		Ovos viáveis de helmintos (ovos/gST)		Vírus (UFC/g)		
	Est.	L	Est.	L	Est.	L	E	S	L	E	S	E	S	E	S	E	S	
Digestão aeróbia	30 d		25-48		-	-	-	-	-	6,3x10 ⁷	2x10 ⁴	P	A**	0,5	A	-	-	Gantzer (2001)
	40 d		*	20	-	-	-	-	-	2,5x10 ⁹	2x10 ⁸	7,5	0,4	-	-	-	-	Farrah e Bitton (1984)
Secagem em leitos de areia ou em bacias	-	-	-	-	35	-	-	-	-	93	240	A	P	A	P	-	-	Lopes <i>et al.</i> (20--)
	-	-	-	-	91	-	-	-	-	3,6	80	A	A	A	A	-	-	
	-	-	-	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	49,8	9,8	-	-	Ferreira (2001)
	-	-	-	-	63	-	-	-	-	-	-	-	-	13,5	5,7	-	-	
	-	-	-	-	47	60	-	-	-	2,4x10 ⁸	5,2x10 ⁷	4,5x10 ³	5 - 50	-	-	-	-	Muhammad, Alaadin e Nabil (2007)
	-	-	-	-	90	-	-	-	-	1,4x10 ⁸	1,1x10 ⁵	5x10 ³	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,5	<0,1	Shanahan <i>et al.</i> (2010)
Digestão anaeróbia	20 d		35		-	-	-	-	3,2x10 ⁸	2,5x10 ⁷	-	-	-	-	-	-	-	Bonjoch e Blanch (2009)
	16 d		35		-	-	-	-	3,2x10 ⁶	3,4x10 ⁴	3,8x10 ⁵	4,2x10 ²	-	-	-	-	-	Chen <i>et al.</i> (2012)
	15d		35-55		-	-	-	-	4,0x10 ⁶	1,3x10 ⁵	-	-	0,7	0,4	-	-	-	Gantzer (2001)
	20 d		35-37		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2x10 ⁴	3,8x10 ³	-	Soares <i>et al.</i> (1994)
Compostagem	26 d	5d	49	> 40	-	-	-	-	1x10 ⁵	<20	-	-	0,7	0	-	-	-	Silva <i>et al.</i> (2004)

Tabela 13 - Eficiência dos processos de redução significativa de patógenos.

(conclusão)

Tratamento	Parâmetros operacionais									Parâmetros biológicos								Referência
	Período mínimo		Temperatura (°C)		Teor de sólidos mínimo (%)		pH			Coliformes termotolerantes (NMP/gST)		Salmonella sp. (NMP/ST)		Ovos viáveis de helmintos (ovos/gST)		Vírus (UFC/g)		
	Est.	L	Est.	L	Est.	L	E	S	L	E	S	E	S	E	S	E	S	
Estabilização com cal	2 h	-	-	-	n.a	12				1,3x10 ⁸	13,2	P	A	-	-	-	-	Brabants <i>et al.</i> (2003)
	2 h	-	-	-	-	12				1,3x10 ⁷	1,1x10 ⁵	13,5	<0,5	135	65	-	-	Bina (2004)
	120 h	-	-	-	-	-					31		0		22	-	-	
	7 d	-	-	-	7,1	12,5				2,2x10 ⁵	A	P	A	-	-	-	-	Chagas <i>et al.</i> (2000)
	0,1 h	2 h	-	-	-	-	-	12		10 ⁶	6.0x10 ⁵	10 ⁴	nd	-	-	10 ⁶	nd	Bean <i>et al.</i> (2007)
	2 h	-	-	-	-	12					nd		nd	-	-	-	-	
	72 h	-	-	-	-	-				-	-	-	-	P	P	-	-	
	<24 h	-	-	-	6,5	12,4				1,2x10 ⁶	<10	P	A	2,3	1,1	-	-	Gantzer (2001)
	<24 h	-	-	-	6,2	12,2				2,4x10 ²	<3,6	A	A	0,4	0,1	-	-	Lima (2010)
	2 h	-	-	-	n.a	>12				-	-	-	-	28	1,8	-	-	Rossmann <i>et al.</i> (2014)
72 h	-	-	-	n.a	>12				-	-	-	-	28	0,2	-	-		

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Legenda: Est. - estudo E- valores de entrada (pré-tratamento); S- valores de saída (pós-tratamento); L- legislação; A- ausente; P- presente; n.a - não apresentado; d - dias; h - horas; m- minutos; nd - não detectável.

Nota:

*25 graus no inverno e 48 fora do inverno;

**Presente somente na amostra tratada no inverno.

Como pode-se observar, na digestão aeróbia o estudo de Gantzer (2001) foi realizado em período mais curto do que os 40 dias mínimos, porém em temperaturas superiores à 20°C, variáveis com a estação em que foi realizado (inverno e fora do inverno). O produto obtido apresentou concentração de coliformes termotolerantes reduzida, porém ainda acima do padrão estabelecido pela legislação de 10^3 NMP/gST, ausência de *Salmonella sp.* na amostra do experimento realizado fora do inverno e presença na do inverno, além da eliminação total dos ovos de helmintos. Já os resultados de Farrah e Bitton (1984), obtidos pela submissão do lodo por 50 dias entre temperaturas de 15 à 29°C, não apresentaram redução suficiente de coliformes termotolerantes para garantir a segurança no biossólido, e nem a eliminação total da *Salmonella sp.*.

Nos casos do processo de secagem em leito ou em bacias (solarização), os quatro estudos utilizaram os leitos como tratamento. No trabalho de Muhammad, Alaadin e Nabil (2007), os diferentes teores de sólidos apresentados referem-se às amostras de diferentes estações do ano. Neste trabalho os autores não definem as concentrações de *Salmonella sp.* para cada estação, portanto, a faixa de valores apresentada na tabela 13 compreende aos valores mínimos e máximos da amostra de Qateef, com o teor de sólidos variando entre 47 e 90, correspondendo aos teores de menor e maior valor dentre as quatro estações do ano. Embora não seja possível concluir os efeitos sobre a *Salmonella sp.*, podemos observar como o tratamento atinge melhores resultados quanto à concentração de coliformes, ou seja, menores concentrações de patógenos, à medida que o teor de sólidos aumenta.

Os resultados apresentados por Lopes *et al.* (2019) representam o produto obtido nos dois diferentes ciclos que compuseram o experimento. O primeiro, com teor de sólidos de 35%, foi o realizado em período chuvoso, enquanto o segundo, com teor de sólidos igual à 91%, em período seco. Embora as concentrações de coliformes estejam abaixo do limite estabelecido pela legislação, uma vez que já eram baixas, nesses resultados, um fenômeno interessante acontece. Contrariamente ao esperado, a concentração de coliformes aumenta e, no experimento do período chuvoso, é detectada a presença de *Salmonella sp.* e ovos de helmintos, anteriormente relatados como não detectados.

Segundo Ferreira (2001), os ovos de helmintos não tiveram redução proporcional ao aumento do teor de sólidos. Enquanto a amostra com teor de sólidos de 40% reduziu 80% na concentração, a de teor igual a 63% reduziu 58%. A eficiência na inativação de vírus entérico é comprovada por Shanahan *et al.* (2010).

Nos estudos que englobam a digestão anaeróbia, os parâmetros operacionais de temperatura (35- 55°C) e período (15 dias) foram atendidos, e apenas um deles não alcançou a concentração de 10^6 NMP/gST. Quanto à *Salmonella sp.*, no estudo de Chen *et al.* (2012), permaneceu presente mesmo após o tratamento, assim como os ovos de helmintos, mesmo em concentração baixa de 0,4 ovos/gST (Gantzer, 2001).

Os efeitos sobre os vírus entéricos são apresentados por Soares *et al.* (1994). Na tabela, os valores expostos representam, dentre as 15 amostras analisadas em seu estudo, realizadas por mais de um ano, as que resultaram em maior e menor eficiência de remoção. A amostra que possuía $1,2 \times 10^4$ de entrada e saída de $3,8 \times 10^3$ teve 68% de remoção, sendo a amostra de novembro de 1998. Já a amostra com valor de entrada igual a 1×10^4 e saída $< 6,2$, com remoção maior que 99,94%, foi de março.

Para a compostagem mesofílica, comprovou-se apenas a redução, próxima da completa remoção dos coliformes termotolerantes e dos ovos de helmintos. Para *Salmonella sp.* e vírus entéricos não foram encontrados estudos que considerassem os parâmetros operacionais necessários para a obtenção dos biossólidos Classe B.

O último processo, que utiliza a cal para a estabilização do lodo, foi caracterizado por diversos estudos de caso, o que indica que essa é uma técnica amplamente disseminada e aplicada. Pode-se observar que, a eficiência sobre todos os patógenos foi muito positiva. Todos produziram biossólidos com padrões de coliformes termotolerantes aceitáveis, e a eliminação de *Salmonella sp.*, apresentando porém, a resistência dos ovos de helmintos que permaneceram no experimento de Bina (2004) em 65 ovos/gST após as 2 horas conforme CONAMA 498/2020 exige, não sendo totalmente eliminado em nenhuma das referências listadas.

Destaca-se dentre os resultados de Bean *et al.* (2007), que em 6 minutos de tratamento, a eficiência da redução sobre os coliformes termotolerantes e vírus entéricos foi alcançada, assim como a *Salmonella sp.* que apresentou valores não detectáveis ao longo de todo o experimento. Os ovos viáveis de helmintos, embora não sejam quantificados no estudo, permaneceram viáveis após 72 horas. Enquanto no experimento de Rossman *et al.* (2014), após as 2 horas possui 1,8 ovo/gST e após 72 horas, 0,2 ovo/gST, e no de Lima (2010), 0,1 ovo/gST em um período inferior à 24 horas.

Conforme visto nas tabelas, pela ausência dos dados referentes aos vírus entéricos, destaca-se a dificuldade na coleta destes dados. Tal fato pode ser em função da grande

dificuldade, relatada por Faria (2018) em um dos estudos por ela citado, em encontrar laboratórios no Brasil qualificados e certificados para realizar análises dos vírus entéricos em amostras de lodo de esgoto, considerando que os métodos utilizados nas análises são complexos e pouco conhecidos no país.

Embora para os processos cujos produtos são bio sólidos Classe A, como secagem térmica, irradiação, e para os de Classe B, como digestão aeróbia, secagem em leito e compostagem, não tenham sido encontrados dados para a comprovação da eficiência dos tratamentos para a redução dos vírus entéricos, podemos observar pelos resultados obtidos que, em todos os estudos os que englobam, os resultados foram positivos. Ou seja, quando os tratamentos foram eficientes para os outros parâmetros microbiológicos, também foram para os vírus entéricos.

Esse argumento pode ser respaldado pela informação exposta por Farias (2018), que evidencia um estudo e afirma que dentre os microrganismos patogênicos presentes no lodo de esgoto sanitário, os vírus entéricos se destacam por serem os menores e menos complexos, o que os torna mais sensíveis às condições ambientais.

Através de todos os resultados obtidos e das análises realizadas nos parágrafos anteriores, embora alguns tratamentos tenham sido comprovados como eficientes na higienização do lodo, produzindo bio sólidos com cargas patogênicas aceitáveis pela CONAMA 498/2020, pudemos concluir que alguns obtiveram produtos com qualidade microbiológica indesejada, outros foram inconsistentes, apresentado-se eficientes em apenas uma das amostras. Esses pontos implicam em um ponto a ser discutido: a segurança dos tratamentos.

Essa segurança está atrelada à qualidade dos produtos finais obtidos em cada um dos tratamentos, que conforme relatado em alguns estudos apresentados, pode ser influenciada por diversos fatores externos como condições operacionais, estações sazonais e a composição do lodo.

Para as condições operacionais, pode-se mencionar Ferreira (2001), sobre o processo de tratamento através do leito de secagem, que reportou a diferença no teor dos sólidos de acordo com a profundidade da camada, salientando a importância de coletar amostras em todas as profundidades para ter representatividade. A autora cita ainda a sedimentação dos ovos de helmintos que acumulam-se na camada inferior do perfil, onde encontram-se fatores favoráveis à sua sobrevivência, como umidade e temperatura amena.

Já as estações sazonais puderam ser observadas no estudo de Soares *et al.* (2014) onde podemos notar a interferência climática causada pelas diferentes estações nas quais o tratamento foi realizado, uma vez que este foi executado no estado do Arizona nos Estados Unidos, onde em novembro é outono e em março primavera, apresentando temperaturas médias mais altas.

Outro aspecto a ser considerado sobre a segurança dos bio sólidos é o recrescimento dos patógenos, documentado em diversos estudos. No de Lopes *et al.* (2019), por exemplo, cujos produtos finais apresentaram um aumento no número de coliformes e *Salmonella sp.* quando comparados com as concentrações pré-tratamento, os autores justificam que pode estar associado a capacidade de multiplicação destes organismos diante de condições ideais de temperatura e umidade.

Lopes *et. al* (2019) associam ainda o crescimento dos coliformes termotolerantes ao decréscimo do pH do lodo, que pode ter criado condições favoráveis a estes organismos. Embora, como mencionado previamente, neste caso as concentrações iniciais e finais tenham baixas, reflete-se sobre a problemática da multiplicação dos organismos, demonstrados como eliminados nos tratamentos, em maiores escalas, podendo oferecer risco à saúde.

Desta forma, como forma de avaliar a segurança na aplicação dos bio sólidos na agricultura, é importante compreender as doses mínimas que oferecem riscos, de cada um dos patógenos que podem compor os lodos e conseqüentemente os bio sólidos. Os coliformes fecais, tem dose infectante entre 10^6 e 10^8 células, assim como a *Salmonella sp.*, com dose infectante de *Salmonella* para humanos saudáveis variável entre 10^6 e 10^8 UFC (Malheiros, Paula e Tondo, 1994).

Já a ingestão de pequena quantidade de ovos de helmintos, ou mesmo de um único ovo de helminto viável, já representa um elevado risco de infecção, segundo Leite (2015). O autor reitera o poder de infectividade dos helmintos, com dose infectante mínima variando de 1 a 10 ovos (apud Soccol *et al.* 2010). E por fim, os vírus entéricos, não foram encontrados valores referentes à dose mínima infectante.

Portanto, visto que a legislação CONAMA 498/2020 abrange o território nacional, considerando as eficiências dos tratamentos do lodo de esgoto obtidas nos estudos apresentados neste trabalho, que as características microbiológicas do lodo estão relacionadas com as condições de saneamento e a qualidade de vida da população que são variáveis em um país tão grande quanto o Brasil e que os sistemas de tratamentos estudados podem sofrer

diversas interferências, ressalta-se a importância do monitoramento dos patógenos nos biossólidos como forma de garantir a segurança à saúde da população que possa vir a consumir os alimentos produzidos pela aplicação deste biossólido, ao meio ambiente e a todos os organismos expostos em quaisquer áreas de aplicação.

6 CONCLUSÃO

A análise comparativa realizada revela que as legislações estabelecem critérios e procedimentos para o uso seguro de biossólidos na agricultura, incluindo restrições específicas quanto à aplicação em certos tipos de culturas e locais, visando proteger a saúde pública e o meio ambiente. Embora apresentem estruturas e conteúdos muito semelhantes, há divergências pontuais, como na classificação e critérios associados, além de padrões de concentração.

No Brasil, a baixa adesão à prática de aplicação de biossólidos na agricultura não parece estar relacionada a desafios regulatórios, pois, em termos de estrutura e padrões, assemelha-se às demais legislações. Por exemplo, na Austrália, mesmo com uma legislação mais restritiva, a prática de destinação de lodo no solo é mais comum do que no Brasil, indicando possíveis fatores que influenciam a segurança percebida do biossólido e a aceitação pública.

Em relação à qualidade microbiológica, que influencia os usos e restrições na legislação brasileira, é evidente que a temperatura, o tempo de tratamento e o pH são cruciais na eliminação de patógenos, apesar de poderem ser afetados por fatores externos. Destaca-se, portanto, a importância do artigo 11º da norma CONAMA 498/2020, que exige a demonstração do atendimento aos requisitos de controle de qualidade do biossólido tratado, garantindo a eliminação dos patógenos de risco, além dos critérios operacionais.

Recomenda-se uma pesquisa mais detalhada sobre organoclorados e outros componentes químicos presentes no lodo, a fim de assegurar a segurança na aplicação de biossólidos. Além disso, ressalta-se a necessidade de monitoramento contínuo na produção e comprovação da higienização de cada lote.

Diversos fatores podem influenciar a disseminação da prática, os quais devem ser estudados para validar sua eficácia. Por exemplo, o planejamento adequado do tratamento do lodo nas estações de esgoto, que historicamente não foi integrado aos projetos no Brasil, tem impacto significativo na disposição final do produto em aterros sanitários, conforme observado por Comparini (2002).

Com a urgência nas mudanças de hábitos e práticas surgem preocupações crescentes sobre a disposição final do lodo, e dessa forma sua gestão sustentável pode ser expandida, seguindo o exemplo de países como a Irlanda, que demonstram altos índices de aplicação agrícola de bio sólidos, aproveitando os benefícios dessa prática.

A aceitação pública é outro aspecto crucial para a utilização agrícola de bio sólidos, tanto por parte dos agricultores quanto da população em geral. A divulgação de informações baseadas em estudos e debates pode aumentar a compreensão e aceitação da prática. A validação da eficácia dos tratamentos e da qualidade final dos produtos é fundamental para ganhar a confiança pública e expandir essa prática em um país com grande potencial agrícola como o Brasil, promovendo uma destinação sustentável para esse resíduo valioso na reciclagem de nutrientes.

Conclui-se, portanto, que a legislação brasileira atual é flexível e bem estruturada, comparável às de países que adotam amplamente a aplicação de bio sólidos na agricultura. Com o cumprimento dessas normativas e o envolvimento ativo dos órgãos reguladores na monitorização da qualidade do bio sólido, é possível garantir a segurança para a saúde e o meio ambiente. Diante da urgência de mudanças de hábitos em prol do desenvolvimento sustentável, o cenário brasileiro para essa prática é positivo e promissor.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Alan Henrique Marques de *et al.* **Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de Schinus terebinthifolia Raddi.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, p. 591-599, 2019.
- AL-GHEETHI, A. *et al.* **Microbial risk associated with application of biosolids in agriculture.** Handbook of Environmental Materials Management, p. 961-971, 2019.
- AL-GHONAIEM, Mohammed I. *et al.* **Application of gamma irradiation in treatment of waste activated sludge to obtain class a biosolids.** American Journal of Environmental Sciences, v. 6, n. 6, p. 500-504, 2010.
- ALMEIDA, Giovanna Caputo *et al.* **Eficiência dos processos químicos e térmicos na higienização de lodo de esgoto.** Iniciação Científica Cesumar, v. 8, n. 1, p. 95-99, 2006.
- ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos:** despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, 2017. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas - ResumoExecutivo_livro.pdf>. Acesso em: 09 abr. 2024.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al.* **A gestão dos biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto doméstico.** Engenharia e Construção, v. 24, p. 18-22, 1998.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al.* **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: Abes, 2006. 417 p.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al.* **Higienização do Lodo de Esgoto.** In: Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro, 2001. p. 87- 116.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al.* **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura.** 1999.
- ANDREOLI, Cleverson Vitório; PINTO, M. **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos.** 273p. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2001.
- ARAÚJO, Vanessa dos Santos *et al.* **Lodo de esgoto e suas potencialidades agrícolas.** Research, Society and Development, v. 11, n. 3, p. e14711326200-e14711326200, 2022.
- AUSTRÁLIA. Australian Water Association. **Guidelines for Sewerage Systems Biosolids Management.** : Environment, Planning And Sustainable Development, 2004.
- AWA - Australian Water Association. **Australian biosolids statistics:** biosolids production in Australia 2010 - 2023. Biosolids production in Australia 2010 – 2023. 2024. Disponível em: <https://www.biosolids.com.au/guidelines/australian-biosolids-statistics/>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- BARRELLA, Karina Medici. **Pesquisa de vírus entéricos humanos em lodos de esgoto originários de duas ETEs do Estado de São Paulo:** estabelecimento e avaliação de

metodologia para recuperação e detecção viral. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008.

BASTOS, Rafael KX; BEVILACQUA, Paula Dias; MARA, David Duncan. **Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, estadunidense e britânica de qualidade microbiológica de biossólidos para uso agrícola.** Revista DAE, v. 191, n. 1, p. 10-20, 2013.

BATISTA, Lucilene Ferreira. **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final.** 2015.

BEAN, Christine L. *et al.* **Class B alkaline stabilization to achieve pathogen inactivation.** International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 4, n. 1, p. 53-60, 2007.

BETTIOL, Wagner; DE CAMARGO, Otávio Antonio. **A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola.** 2006.

BINA B., MOVAHEDIAN H., KORD I. **The effect of the lime stabilization on the microbiological quality of sewage sludge.** IRANIAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCE AND ENGINEERING. 2004; Vol. 1.p. 34-38. Available from: <https://sid.ir/paper/531340/en>

BONJOCH, Xavier; BLANCH, A. R. **Resistance of fecal coliforms and enterococci populations in sludge and biosolids to different hygienisation treatments.** Microbial ecology, v. 57, p. 478-483, 2009.

BORGES, Diélen. **Cientistas da UFU produzem fertilizante com lodo de esgoto.** 2018. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2018/09/cientistas-da-ufu-produzem-fertilizante-com-lodo-de-esgoto>. Acesso em: 12 maio 2024.

BRABANTS, Jacqueline J. *et al.* **Evaluation of bacterial, enteric virus, protozoan, and helminth persistence in class B lime stabilized sludge.** In: Residuals and Biosolids Conference 2003. Water Environment Federation, 2003. p. 1215-1227.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - Snsa. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - Snis. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto.** Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 03 abr. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Plano Nacional de Saneamento Básico: relatório de avaliação anual 2020.** Brasília, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Critérios e**

procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. Publicado no D.O.U. de 21 de agosto de 2020.

BUTA, Martyna *et al.* **Sewage sludge in agriculture—the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops—a review.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 214, p. 112070, 2021.

CABREIRA, Gerhard Valkinir *et al.* **Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais.** *Floresta*, v. 47, n. 2, p. 165-176, 2017.

CAMINADA, Suzete Maria Lenzi *et al.* **Avaliação do processo de compostagem de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto: legislação, parâmetros biológicos, comportamento dos nutrientes, e condições físico-químicas.** *Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 3, n. 2, p. 13-22, 2023.

CARRINGTON, E. G. *et al.* **Destruction of fecal bacteria, enteroviruses and ova of parasites in wastewater sludge by aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic digestion.** *Water Science and Technology*, v. 24, n. 2, p. 377-380, 1991.

CARVALHO, Cristina Silva *et al.* **Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 3, p. 413-419, 2015.

CARVALHO, Paulo de Campos Torres de; CARVALHO, Fernando José Pereira de Campos, **Legislação sobre biossólidos** In: TSUTIYA, Milton Tomoyuki. *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ed.). Biossólidos na Agricultura.* 2. ed. São Paulo, 2002. p. 209-226.

CHAGAS, Welington Ferreira *et al.* **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no estado do Rio de Janeiro.** 2000. Tese de Doutorado.

CHANG, A. C. **Land application of sewage sludge: pathogen issues.** *Sewage sludge and wastewater for use in agriculture*, p. 183, 1997.

CHEN, Yan *et al.* **Reactor performance and bacterial pathogen removal in response to sludge retention time in a mesophilic anaerobic digester treating sewage sludge.** *Bioresource technology*. v. 106, 2012. p. 20- 26.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina *et al.* **Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: Overview.** *Sustainability*, v. 11, n. 21, p. 6015, 2019.

COMPARINI, João Baptista. **Engenharia de aplicação dos biossólidos.** In: TSUTIYA, Milton Tomoyuki. *Biossólidos na Agricultura.* Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ed.). 2. ed. São Paulo, 2002. p. 405 - 431.

DARVODELSKY, Paul. **BIOSOLIDS SNAPSHOT.** Department Of Sustainability, Environment, Water, Population And Communities, 2011. Disponível em: <https://www.agriculture.gov.au/sites/default/files/documents/biosolids-snapshot.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2024.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto: determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

EUROPÉIA, União. **Tipos de legislação: as diretivas. As diretivas**. 2024. Disponível em: https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_pt. Acesso em: 25 abr. 2024.

EUROSTAT. **Data Browser: sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s))**. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater (in dry substance (d.s)). 2024. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00030/default/table?lang=en>. Acesso em: 17 abr. 2024.

FARRAH, SAMUEL R.; BITTON, GABRIEL. **Enteric bacteria in aerobically digested sludge**. *Applied and environmental microbiology*, v. 47, n. 4, p. 831-834, 1984.

FARIA, Marianne Fidalgo de. **Compostagem de lodo de esgoto e indicadores de Patogenicidade**. 2018. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Florestal, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2018.

FERREIRA, A. C. **Monitoramento do Uso de Estufa Plástica e Aproveitamento do Biogás na Secagem e Desinfecção de Lodo Anaeróbio em Leito de Secagem**. Curitiba, 98p. Tese, Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2001.

FILIPPI, Ádila Cristina Krukoski *et al.* **Toxicidade de lodo de esgoto sanitário: subsídios para tomada de decisão ambientalmente correta antes da incorporação em solos agrícolas**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FLORES, Araceli Verônica *et al.* Organoclorados: um problema de saúde pública. *Ambiente & Sociedade*, v. 7, p. 111-124, 2004.

GANTZER, C. *et al.* **Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge**. *Water Research*, v. 35, n. 16, 2001. p. 3763-3770.

GONÇALVES, Ricardo Francis *et al.* **Desidratação de Lodo de Esgotos**. In: Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro, 2001. p. 57 - 86.

GUZMÁN, C. *et al.* **Occurrence and levels of indicators and selected pathogens in different sludges and biosolids**. *Journal of applied microbiology*, v. 103, n. 6, 2007.p. 2420-2429.

HILL, Julian. **Recycling biosolids to pasture-based animal production systems in Australia: a review of evidence on the control of potentially toxic metals and persistent organic compounds recycled to agricultural land**. *Australian journal of agricultural research*, v. 56, n. 8, p. 753-773, 2005.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA . **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IRELAND. S.I. No. 148/1998 - **Waste Management (Use of Sewage Sludge in Agriculture) Regulations. 1998.** Government of Ireland. Available online: <http://www.irishstatutebook.ie/eli/1998/si/148/made/en/print>. Acesso em: 21 abr. 2024.

KELLER, Regina *et al.* **Disinfection of sludge using lime stabilization and pasteurization in a small wastewater treatment plant.** *Water Sci. Technol.*, 50(1), 2004. p. 13 –17

LEITÃO, A (2015). **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI.** Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting. 1 (2), 149-171. Disponível em <http://u3isjournal.isvouga.pt/index.php/PJFM>

LEITE, Thiago de Almeida. **Compostagem termofílica de lodo de esgoto: higienização e produção de bio sólido para uso agrícola.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

LIMA, Márcia Regina Pereira. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LLORET, Eva *et al.* **Evaluation of the removal of pathogens included in the Proposal for a European Directive on spreading of sludge on land during autothermal thermophilic aerobic digestion (ATAD).** *Chemical engineering journal*, v. 198, p. 171-179, 2012.

LOPES, Antonia Michelle Araújo *et al.* Desaguamento e higienização do lodo de esgoto em leito de secagem com cobertura plástica. **As Múltiplas Visões do Meio Ambiente e Os Impactos Ambientais**, [s. l], v. 20, n. -, p. 307-344, 2019.

MALHEIROS, Patrícia da Silva; PAULA, Cheila Minéia Daniel de; TONDO, Eduardo Cesar. **Cinética de crescimento de Salmonella Enteritidis envolvida em surtos alimentares no RS: uma comparação com linhagens de outros sorovares.** *Food Science and Technology*, v. 27, p. 751-755, 2007.

MARCHUK, Serhiy *et al.* **Biosolids-derived fertilizers: A review of challenges and opportunities.** *Science of The Total Environment*, v. 875, p. 162555, 2023.

MARTINS, Bruno Henrique da Silva *et al.* **Uso de Bio sólido na Agricultura.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, p. 64-72, 2015.

MATEO-SAGASTA, Javier; RASCHID-SALLY, Liqa; THEBO, Anne. **Global wastewater and sludge production, treatment and use.** *Wastewater: Economic asset in an urbanizing world*, p. 15-38, 2015.

MELMED, LN & COMNINOS, D. K. **Disinfection of sewage sludge with gamma radiation.** *Water SA*, v. 5, n. 4, p. 153-159, 1979.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P.; TCHOBANOGLOUS, Georg. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse.** New York: McGraw-Hill, 1991.

Muhammad, H. Malack , Alaadin, Bukhari A., Nabil, S. Abuzaid. **Fate of pathogens in sludge sand drying beds at Qateef, Khobar and Dammam: A case study.** *Int. J. Environ. Res.* 1 (1), 19–27. 2007

PAZ-FERREIRO, Jorge *et al.* Biochar from biosolids pyrolysis: a review. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 5, p. 956, 2018.

TAVARES, Talissa de Moraes; CARDOSO, Divina das Dores de Paula; BRITO, Wilia Marta Elsner Diederichsen de. **Vírus entéricos veiculados por água: aspectos microbiológicos de controle de qualidade da água**. Revista De Patologia Tropical/Journal of Tropical Pathology, v. 34, n. 2, 2005.

MUTER, Olga *et al.* Application of the sewage sludge in agriculture: Soil fertility, techno economic, and life-cycle assessment. In: Jeyakumar, R.B., Sankarapandian, K., Ravi, Y.K. (Eds.). **Hazardous Waste Management**, 2022. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104264>.

NEW SOUTH WALES. Environment Protection Authority. **Use and disposal of biosolids products**. New South Wales: Environment Protection Authority, 2000.

OKOFFO, Elvis D. *et al.* **Release of plastics to Australian land from biosolids end-use**. Environmental science & technology, v. 54, n. 23, p. 15132-15141, 2020.

PATEL, Savankumar *et al.* **A critical literature review on biosolids to biochar: an alternative biosolids management option**. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 19, p. 807-841, 2020.

PEDROZA, Marcelo Mendes *et al.* **Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão**. 2010.

PIKE, E. B.; CARRINGTON, E. G.; HARMAN, S. A. **Destruction of salmonellas, enteroviruses and ova of parasites in wastewater sludge by pasteurization and anaerobic digestion**. Water Science and Technology, v. 20, n. 11-12, p. 337-343, 1988.

QUEENSLAND. Department of Environment and Science. **End of Waste Code: Biosolids (ENEW07359617)**. Queensland Government, 2020. Disponível em: https://www.des.qld.gov.au/policies?a=272936:policy_registry/wr-eowc-approved-biosolids.pdf. Acesso em: 26 abr. 2024.

RIGBY, Hannah *et al.* A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of the Total Environment**, v. 541, p. 1310-1338, 2016.

RIGO, Michelle M. *et al.* **Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil**. Gaia Scientia, v. 8, n. 1, p. 174-186, 2014.

Rorat, A., Courtois, P., Vandenbulcke, F., Lemiere, S. **Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management**. Industrial And Municipal Sludge. Elsevier, pp. 155–180. 2019 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00008-8>.

ROSSMANN, Maíke *et al.* **Redução da viabilidade de ovos de helmintos em lodo de esgoto doméstico calcado**. Revista Engenharia na Agricultura-REVENG, v. 22, n. 1, p. 43-49, 2014.

SANEPAR. **Sanepar ganha prêmio-destaque por uso do lodo de esgoto na agricultura.** 2022. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br/noticias/sanepar-ganha-premio-destaque-por-uso-do-lodo-de-esgoto-na-agricultura>. Acesso em: 19 abr. 2024.

SANTOS, Rizia Rodrigues. **Extração sólido – líquido com purificação em baixa temperatura: uma técnica eficiente para a extração de dez organoclorados em lodo de esgoto.** 2015. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Mestrado em Produção Vegetal, Área de Concentração em Produção Vegetal, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2015.

SHADDEL, Sina *et al.* **Sustainable sewage sludge management: From current practices to emerging nutrient recovery technologies.** *Sustainability*, v. 11, n. 12, p. 3435, 2019.

SHANAHAN, Emily F. *et al.* Evaluation of pathogen removal in a solar sludge drying facility using microbial indicators. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 7, n. 2, p. 565-582, 2010.

SIDHU, Jatinder PS; TOZE, Simon G. Human pathogens and their indicators in biosolids: a literature review. **Environment international**, v. 35, n. 1, p. 187-201, 2009.

SILVA, Rodolpho Luiz Lopes; MOREIRA, Tais A. **Pesticidas organoclorados no meio ambiente toxicidade e persistência.** São Paulo: Faculdade de Tecnologia Oswaldo Cruz. 2022.

SILVA, Wilson Tadeu Lopes da. *et al.* **Método de Aproveitamento Biossólido Proveniente de Lodo de Esgoto Residencial Através de Processo de Compostagem Seguido de Biodigestão Anaeróbia.** 2004.

SOARES, Ana C. *et al.* **Effect of anaerobic digestion on the occurrence of enteroviruses and Giardia cysts in sewage sludge.** *Journal of Environmental Science & Health Part A*, v. 29, n. 9, p. 1887-1897, 1994.

SOUTH AUSTRALIA. Environment Protection Authority. **Guidelines for the safe handling and reuse of biosolids in South Australia.** South Australia: Environment Protection Authority, 2020.

SOUZA, Gloria SMB de *et al.* Disinfection of domestic effluents by gamma radiation: effects on the inactivation of *Ascaris lumbricoides* eggs. **Water research**, v. 45, n. 17, p. 5523-5528, 2011.

TASMÂNIA, Environment Protection Authority. **Tasmanian Biosolids Reuse Guidelines.** Tasmânia: Environment Protection Authority. Hobart, Tasmania, 2020.

TIMONEY, Fehily and Company. **Codes of Good Practice for the Use of Biosolids in Agriculture:** guidelines for local authorities and wastewater treatment plant operatives. Ireland: Department Of The Environment And Local Government, 1998.

USEPA- United States Environmental Protection Agency. **Basic Information about Biosolids:** biosolids uses. *Biosolids Uses*. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-biosolids>. Acesso em: 18 abr. 2024.

USEPA - United States Environmental Protection Agency (1993). **The standards for the use or disposal of sewage sludge**. Washington, DC: Federal Register, Code of Federal Regulations [CFR], Title 40, Part 503.

VAN HAANDEL, Adrianus Cornelius; MARAIS, Gerrit. **O comportamento do sistema de lodo ativado**. Campina Grande: Epgraf, 1999.

VICTORIA, Epa. **Guidelines for environmental management: biosolids land application**. Victoria: Epa Victoria, 2004.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, Marcos; GONÇALVES, Ricardo Franci. Lodo de esgotos: características e produção. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, p. 17-67, 2001.**

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Biossólidos na Agricultura**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ed.). 2. ed. São Paulo, 2002. 468 p.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos**. In: TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Biossólidos na Agricultura**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ed.). 2. ed. São Paulo, 2002. p. 89-131.

WESTERN AUSTRALIA. Department Of Environment And Conservation. **Western Australian guidelines for biosolids management**. Western Australia: Environmental Regulation Division, 2012.

WWF - World Wide Fund for Nature. **Relatório Planeta Vivo 2022 – Construindo uma sociedade positiva para a natureza**. Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D. & Petersen, T. (Eds). WWF, Gland, Suíça.

ZHANG, Shuting *et al.* **Novel electro-dewatering system for activated sludge biosolids in bench-scale, pilot-scale and industrial scale applications**. Chemical Engineering Research and Design. 2017; 1159- 1172.