

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

EMANUELLE SANTOS BARROS

**USO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDO GERADO A PARTIR DE UM REATOR
UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO: UMA ANÁLISE DE RISCOS
MICROBIOLÓGICOS PARA OS TRABALHADORES RURAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Daniele Vital Vich

MACEIÓ

2023

EMANUELLE SANTOS BARROS

**USO AGRÍCOLA DE BIODOSSÍLIDO GERADO A PARTIR DE UM REATOR
UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO: UMA ANÁLISE DE RISCOS
MICROBIOLÓGICOS PARA OS TRABALHADORES RURAIS**

Relatório Parcial de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ivete Vasconcelos
Lopes Ferreira

Coorientadora: Prof^a Dr^a Daniele Vital Vich

MACEIÓ

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B277u Barros, Emanuelle Santos.

Uso agrícola de bioossólido gerado a partir de um reator UASB tratando esgoto doméstico : uma análise de riscos microbiológicos para os trabalhadores rurais / Emanuelle Santos Barros. – Maceió, 2022.

51 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientadora: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.

Co-orientadora: Daniele Vital Vich.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 47-51.

1. Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico. 2. Lodo de esgoto. 3. Bioossólidos. 4. *Ascaris lumbricoides*. 5. Hortaliças - Consumo. 6. Hortaliças - Cultivo - Riscos ocupacionais. I. Título.

CDU: 628.32/.35

FOLHA DE APROVAÇÃO

AUTOR: EMANUELLE SANTOS BARROS

USO AGRÍCOLA DE BIOSSÓLIDO GERADO A PARTIR DE UM REATOR UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO: UMA ANÁLISE DE RISCOS MICROBIOLÓGICOS PARA OS TRABALHADORES RURAIS

Relatório Parcial de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de
Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Documento assinado digitalmente



IVETE VASCONCELOS LOPES FERREIRA

Data: 28/12/2022 21:09:28-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira – UFAL

Documento assinado digitalmente



DANIELE VITAL VICH

Data: 30/12/2022 11:09:57-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Daniele Vital Vich – UFAL

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



MARCIO GOMES BARBOZA

Data: 29/12/2022 16:26:35-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Marcio Gomes Barboza – UFAL

Documento assinado digitalmente



DANIEL PINTO FERNANDES

Data: 29/12/2022 11:25:09-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes – UFAL

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me permitido a incrível oportunidade de ter cursado essa graduação, por me dá forças para superar as dificuldades e me ajudar a vencer mais etapa em minha vida.

Aos meus pais, Joan e Edileusa, por me ensinarem a importância da educação e por todo o esforço que fizeram para me proporcionar sempre o melhor. Só tenho a agradecer por tanto incentivo, por sempre acreditarem em mim e apoiarem as minhas escolhas. Vocês foram fundamentais para essa conquista.

Ao meu esposo, Lucas Iago, pelo apoio ao longo desses oito anos de relacionamento e por ser um companheiro incrível. Pelas lutas diárias, os choros e as risadas. Que mesmo sendo muito jovens, soubemos dividir muito bem nossas responsabilidades. Obrigada por partilhar essa história comigo.

A minha irmã, Gabriella, por todo apoio e companheirismo. Por todos os momentos especiais e por cada gesto de incentivo, me dando força e estando comigo nos momentos mais difíceis.

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Ivete Lopes, por cada palavra, cada orientação, cada preocupação, paciência e dedicação, desde o início dos projetos de iniciação científica, até agora, neste trabalho de conclusão de curso e a minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Daniele Vich, por aceitar a coorientação.

À banca examinadora, Prof. Dr. Marcio Barboza e Prof. Dr. Daniel Pinto, por aceitarem avaliar o meu trabalho e contribuírem para o seu aperfeiçoamento e enriquecimento.

Aos amigos que estiveram comigo durante essa jornada: Erick Phelipe, Wesley, Lívia Andressa e Mylena Gabriela, por cada momento de amizade e parceria, seja com os trabalhos ou momentos de descontração. Vocês tornaram essa jornada mais prazerosa e me ajudaram a persistir até o fim.

Aos tutores que me acompanharam em diferentes momentos da graduação: Prof. Marllus Neves, Engenheiro Fabricio Lima, Engenheiro Tairo do Vale, Engenheiro Paulo Freire, Engenheira Heloize Nascimento, Engenheiro Heverton Henrique, Engenheiro Paulo Correia e Engenheiro Edmilson Correia. Obrigada pelas oportunidades de iniciação científica, grupo de pesquisa e estágio, por toda paciência, disponibilidade e ensinamentos transmitidos.

Um agradecimento especial aos professores Selêude Nóbrega, Christiano Cantarelli, Eduardo Lucena, Karina Salomon. Todos vocês, além de ótimos profissionais, são pessoas admiráveis. Obrigada por tudo. Agradeço aos demais professores por todo o conhecimento passado e dúvidas esclarecidas.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização de mais essa etapa em minha vida. Muito obrigada!

RESUMO

Com o aumento da população e do uso da água nas atividades domésticas e industriais, é notável o crescimento da geração de efluentes em todo o mundo. O tratamento de efluentes para a remoção de substâncias e patógenos indesejáveis gera um resíduo sólido em quantidade e qualidade variáveis, denominado de lodo de esgoto. Após tratamento adequado, o lodo de esgoto transforma-se em um novo material, os biossólidos, com grande potencial de uso agrícola, por suas propriedades nutricionais para plantas e de retenção de água no solo. O uso agrícola desses subprodutos das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) é uma alternativa para disposição final, porém, o risco à saúde associado à presença de patógenos é um entrave à tal prática. As legislações que regulamentam a aplicação e uso de biossólidos são, por vezes, muito restritivas, e não levam em consideração a avaliação de riscos. Nesse contexto, a Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos (AQRM) é uma ferramenta matemática que pode ser usada para calcular os riscos associados a diferentes patógenos em diferentes cenários de exposição ao risco. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os riscos microbiológicos em função do uso de lodo de esgotos e biossólidos no solo, para fins agrícolas, utilizando a AQRM para diferentes cenários de exposição, onde trabalhadores rurais tanto realizam a aplicação no biossólido no ato da plantação, quanto realizam o manejo desse biossólidos nas culturas de cenoura e alface, e tendo como microrganismo alvo *Ascaris lumbricoides*. Serão utilizados dados secundários de caracterização microbiológica de lodos de esgotos e biossólidos de ETE, para aplicação da AQRM, obtidos a partir da revisão da literatura. A metodologia da AQRM envolve quatro etapas que serão desenvolvidas, a saber: (i) Identificação e caracterização do perigo / formulação do problema; (ii) Avaliação da exposição; (iii) Análise dose-resposta e (iv) Caracterização do risco. Os riscos calculados serão confrontados com os riscos toleráveis pela Organização Mundial da Saúde ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa – por pessoa por ano). Os resultados também serão confrontados com os padrões brasileiros e internacionais adotados para aplicação de biossólidos no solo. De acordo com os dados apresentados, todos os cenários de exposição resultaram em riscos anuais de infecção por helmintos acima do aceitável pela OMS, ou seja, maior que $1,2 \times 10^{-4}$ pppa. Vale ressaltar a importância da higienização do lodo proveniente de um reator UASB, que passou apenas por um leito de secagem, antes do uso agrícola.

Palavras chave: AQRM; Lodo de esgoto; Biossólidos; *Ascaris lumbricoides*; Risco do consumidor; Risco do trabalhador.

ABSTRACT

With the increase in population and the use of water in domestic and industrial activities, the growth of effluent generation around the world is remarkable. The effluents for the removal of substances and treatment mechanisms of consistent quality and quantity, called the quantity of sewage. After proper treatment, sewage sludge is transformed into a new material, biosolids, with great potential for agricultural use, due to its water and soil nutrition properties. The use of these agricultural by-products from Effluent Treatment Stations (ETSs) is an alternative for final provision, however, the health risk associated with the presence of pathogens is an obstacle to this practice. The laws that regulate the application and use of biosolids are sometimes very restrictive, and do not take into account the risk assessment. In this, the Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) is a mathematical tool that can be used to calculate the risks associated with different pathogens in different risk exposure scenarios. Thus, this work aims to evaluate the microbiological risks due to the use of sludge and biosolids in the soil, for agricultural use, using the QMRA for different exposure scenarios, where agricultural workers both perform the application in the biosolid in the biosolid in the planting of plantation, how to carry out the management of these biosolids in the cultures of carrots and lettuce, and having *Ascaris lumbricoides* as a target microorganism. Secondary data will be used for microbiological characterization of sewage sludge and ETS biosolids, for the application of QMRA, obtained from the literature review. The QMRA methodology involves four steps that facilitate, namely: (i) Hazard identification / problem formulation; (ii) Exposure assessment; (iii) Dose-response analysis and (iv) Risk characterization. confronted with the tolerable risks by the World Health Organization (1.2×10^{-4} pppy - per person per year). The results will also be confronted with the Brazilian standards and adopted for the application of biosolids in the soil. According to the data presented, all exposure scenarios resulted in risk, above those presented by WHO, that is 1.2×10^{-4} pppy. It is worth mentioning the importance of sanitizing the sludge from a UASB reactor, which only passed through a drying bed, before agricultural use.

Keywords: QMRA; Sewage Sludge; Biosolids; *Ascaris lumbricoides*; Consumer risk; Worker risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais etapas e alternativas para o gerenciamento do lodo gerado em ETEs	21
Figura 2: Disposição das descargas e dos leitos de secagem no sistema experimental..	31
Figura 3: Esquema representativo do modelo de exposição relativo ao cenário 1, de ingestão de partículas de biossólidos durante atividades de adubação.....	34
Figura 4: Esquema representativo do modelo de exposição relativo ao cenário 2, de ingestão de partículas de partículas de solo durante atividades de manejo dos cultivos após incorporação de biossólidos.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Operações unitárias para tratamento do lodo e, conseqüentemente, geração de biossólidos.	20
Quadro 2: Os principais helmintos encontrados em águas residuais e as doenças relacionadas.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Organismos identificados em biossólidos e lodos de esgotos sanitários.....	24
Tabela 2: Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos	28
Tabela 3: Limites de concentrações de ovos de helmintos para utilização de biossólidos, conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a Organização Mundial da Saúde e o Conselho Nacional de Meio Ambiente do Brasil.....	29
Tabela 4: Médias e desvios padrão da concentração de ovos viáveis de helmintos/g de sólidos totais no ponto de descarga B.....	32
Tabela 5: Médias e desvios padrões da concentração de ovos viáveis de helmintos. g ⁻¹ de sólidos totais.	38
Tabela 6: Concentrações de ovos viáveis de Ascaris por grama de sólidos totais utilizadas na aplicação da AQRM.....	38
Tabela 7: Avaliação da exposição na aplicação de lodo/biossólido no solo	39
Tabela 8: Avaliação da exposição no manejo das culturas de alface e cenoura.....	39
Tabela 9: Avaliação da dose-resposta para aplicação e manejo da alface e da cenoura	41
Tabela 10: Caracterização do risco anual	40
Tabela 11: Concentrações toleráveis de A. lumbricoides em biossólidos para uso em adubação	44
Tabela 12: Concentrações toleráveis de A. lumbricoides em biossólidos para manejo de culturas de alface e cenoura.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQRM Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

DALY *Disability Adjusted Life Years* (anos de vida perdidos ajustados por incapacidade)

ETE Estação de Tratamento de Efluentes

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LRA Laboratório de Reúso de Águas

OMS Organização Mundial da Saúde

pppa Por pessoa por ano

pppd Por pessoa por dia

pppy *Per person per year*

PRAP Processos de Redução Adicional de Patógenos

PRSP Processos de Redução Significativa de Patógenos

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SNS Secretaria Nacional de Saneamento

TCC Trabalho de Conclusão de Curso

t ST/ha Toneladas de sólidos totais por hectare

UASB *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UFAL Universidade Federal de Alagoas

U.S. EPA *United States Environmental Protection Agency*

WHO World Health Organization

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	18
	2.1 Objetivo geral:	18
	2.2 Objetivos específicos:	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
	3.1 Tratamento de efluentes e geração de lodo/biossólido	19
	3.2 Tratamento e destinação final de lodo de esgotos	20
	3.3 Conceito de economia circular e aproveitamento dos subprodutos das ETEs. 22	
	3.4 Características físico-químicas e microbiológicas do lodo.....	23
	3.5 Doenças transmitidas pelo solo.....	24
	3.6 Avaliação de riscos microbiológicos (AQRM).....	25
	3.7 Padrões para uso dos biossólidos	27
	3.7.1 Padrões Internacionais	27
	3.7.2 Padrões Nacionais.....	27
	3.7.3 Análise crítico-comparativa.....	29
4	METODOLOGIA	30
	4.1 Dados secundários de lodo de esgoto e biossólido para aplicação da AQRM 30	
	4.2 Descrição da ETE	30
	4.3 Dados utilizados.....	31
	4.4 População alvo: trabalhadores rurais	32
	4.5 Aplicação da AQRM.....	32
	4.5.1 Identificação do perigo	32
	4.5.2 Avaliação da exposição	33
	4.5.3 Avaliação da dose-resposta	34
	4.5.4 Caracterização do risco.....	35
	4.6 Valor de referência.....	35
	4.7 Determinação dos Valores Máximos Permitidos de microrganismo.....	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
	5.1 Dados de biossólidos a serem avaliados	38
	5.2 Análise quantitativa de risco microbiológico	38
	5.2.1 Identificação do perigo	38
	5.2.2 Avaliação da exposição	39
	5.2.3 Avaliação da dose-resposta	41
	5.2.4 Caracterização do risco anual de infecção.....	42

5.3	Determinação dos Valores Máximos Permitido das concentrações de <i>Ascaris lumbricoides</i> no biossólido para atender aos riscos toleráveis	43
5.4	Análise crítico-comparativa	44
6	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A coleta e tratamento de esgotos fazem parte dos serviços de saneamento básico, sendo um dos requisitos para a qualidade de vida da população e preservação ambiental, visto que esses efluentes são fontes de transmissão de diversas doenças. O tratamento de esgotos sanitários origina um subproduto denominado de lodo de esgoto. Após tratamento apropriado, o lodo de esgoto torna-se em um novo material, conhecido com biossólidos.

Com o aumento da produção orgânica de alimentos proveniente de uma demanda crescente por alimentos mais saudáveis, os biossólidos estão sendo muito utilizados, em todo o mundo, na agricultura como fertilizante. Pois, além de se tratar de um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes, possibilita de maneira inovadora a gestão dos resíduos sólidos gerados no tratamento de esgotos domiciliares, considerando aspectos sanitário, legal, ambiental e econômico (COSTA *et al.*, 2012).

A utilização do lodo proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) na agricultura é uma alternativa para disposição final, porém ainda é problemática, visto que esse composto contém microrganismos patogênicos (bactérias, vírus, protozoários e helmintos) capazes de causar doença em um hospedeiro se o manejo do resíduo for realizado de modo inadequado. Com isso, esse tipo de manuseio deve ser realizado com uma atenção especial, visto que um dos grupos que são expostos a uma possível contaminação são os agricultores envolvidos em atividades de aplicação e manejo de biossólidos no campo. Portanto, para garantir que a utilização seja segura, é necessário que o lodo seja submetido a processos de tratamento capazes de eliminar ou reduzir esses patógenos a níveis considerados seguros.

Muitos países, inclusive o Brasil, dispõem de legislações que estabelecem os limites máximos permitidos de microrganismos patogênicos para a aplicação de biossólidos na agricultura. Entretanto, esses limites muitas vezes não são alcançados quando o tratamento do lodo é realizado por tecnologias acessíveis. Além disso, muitos especialistas criticam o fato de que tais limites foram baseados em evidências epidemiológicas limitadas, e não pela estimativa de risco real para a saúde (BLUMENTHAL *et al.*, 2000; EISENBERG *et al.*, 2008; NAVARRO *et al.*, 2009; BASTOS *et al.*, 2013).

Pelo fato das legislações que regulamentam a aplicação e uso de biossólidos serem muito limitadas, e não levarem em consideração a avaliação de riscos, a Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos (AQRM) surge como uma ferramenta útil, que pode ser utilizada para calcular os riscos associados a diferentes patógenos em diferentes cenários de exposição ao risco. Neste trabalho será aplicada a AQRM e analisados os riscos para os trabalhadores rurais no manuseio de biossólidos, seja na sua aplicação no solo, seja no manejo de culturas, e tendo como microrganismo alvo *Ascaris lumbricoides*.

Alguns trabalhos com aplicação de AQRM foram desenvolvidos no Laboratório de Reúso de Águas – LRA, do Centro de Tecnologia da UFAL, nos quais a ferramenta foi utilizada para avaliação de riscos relativos ao reúso de águas cinzas (ALVES, 2018; FERREIRA et al., 2018) e de efluentes de estações de tratamento de esgotos domésticos (SILVA, 2020; BARROS et al., 2021; FERREIRA et al., 2021), e mais recentemente, no uso de biossólidos para fins agrícolas (MELO et al., 2021). Esta é uma linha de pesquisa que vem crescendo no Centro de Tecnologia, sendo de grande aplicação no campo da Engenharia Ambiental e Sanitária, contribuindo para o aproveitamento seguro e sustentável de subprodutos do saneamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral:

Avaliar os riscos microbiológicos para trabalhadores rurais associados a ovos de helmintos (*Ascaris lumbricoides*), em função da aplicação de lodo de esgoto e biossólido no solo, a partir de dados secundários de caracterização microbiológica desses materiais gerados em Estação de Tratamento de Esgoto.

2.2 Objetivos específicos:

- 1) Realizar busca na literatura especializada de dados de caracterização microbiológica de lodo de esgotos e biossólidos;
- 2) Utilizar a ferramenta AQRM (Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos) para estimar a probabilidade anual do risco de infecção por helmintos (*Ascaris lumbricoides*), para os trabalhadores envolvidos na aplicação de lodo de esgoto e/ou biossólido no solo e nas atividades de manejo durante o cultivo de alface e cenoura;
- 3) Avaliar os riscos anuais de infecção dos trabalhadores rurais e confrontá-los com as orientações de riscos toleráveis estabelecidos pela OMS;
- 4) Indicar os Valores Máximos Permitidos para *Ascaris lumbricoides* no biossólido em função dos cenários de exposição avaliados;
- 5) Confrontar os resultados com os padrões brasileiros adotados para aplicação de biossólidos no solo (BRASIL, 2020), e com padrões internacionais (U.S. EPA, 1993; WHO, 2006a).

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Tratamento de efluentes e geração de lodo/biossólido

A coleta e o tratamento de esgotos fazem parte do saneamento básico, e são ações indispensáveis para a promoção da saúde pública e manutenção dos recursos naturais, como os corpos hídricos, potenciais mananciais de abastecimento público. Estima-se que em 2020, 4,8 bilhões de m³ de esgotos foram tratados no Brasil (SNIS, 2021).

Esgoto é o termo usado para caracterizar os efluentes oriundos dos diversos usos de águas, tais como, uso doméstico, comercial, hospitalar, industrial de utilidade pública, de áreas agrícolas, dentre outros (CHAGAS, 2000).

Segundo Andreoli et al. (2001), o lodo de esgotos é um resíduo do tratamento de esgotos sanitários que se apresenta em forma líquida ou líquida semissólida. A produção de lodo de esgoto em uma ETE, está diretamente ligada ao tipo de tratamento que é utilizado na fase líquida. Se esse lodo for gerado após os processos de tratamento primário, então são chamados de lodo primário, ou após os processos de tratamento biológico, sendo chamado de lodo secundário.

A escolha destas etapas no tratamento do esgoto depende de fatores como as características do esgoto e de sua disposição final (reúso agrícola, disposição em corpos d'água), por exemplo. Entretanto, quando são transformados em biossólidos e utilizados na agricultura como condicionantes de solos, promovem uma reciclagem agrícola, visto que ocasionam melhorias físicas nos solos e viabilizam a reciclagem de nutrientes (MAGALHÃES, 2012).

Nos anos 90, o termo “biossólidos” começou a ser utilizado para nomear o lodo de esgoto que foi suficientemente processado a fim de permitir sua reciclagem e aplicação como fertilizante, com o intuito de melhorar e manter, de maneira sustentável, a produtividade dos solos e estimular o crescimento de plantas (U.S. EPA, 1995). Objetiva destacar potencial uso benéfico do material, tendo em vista a quantidade de matéria orgânica, nutrientes, umidade e outras qualidades que os biossólidos possam conter, ao

invés de ser considerado apenas um resíduo a ser disposto, por exemplo, por incineração ou aterramento sanitário (DIAS 2012; MAGALHÃES, 2012; NEBRA, 2007).

3.2 Tratamento e destinação final de lodo de esgotos

A destinação e gestão apropriada do lodo de esgoto é um tanto complexa e de alto custo, podendo chegar a 60% de investimento de uma ETE (ANDREOLI et al., 1999). Em contrapartida, a disposição final convencional, sem nenhum tipo de tratamento, além de não atender às exigências legais, afeta diretamente o meio ambiente, podendo contaminar os recursos hídricos e conseqüentemente gerar um grande problema na saúde pública de seus usuários.

De acordo como o Quadro 1, a seguir, existem várias operações unitárias para tratamento do lodo de esgoto com vistas à recuperação dos nutrientes, gerando biossólidos, principalmente as que objetivam a estabilização da matéria orgânica. Ressalta-se que as operações unitárias aplicadas individualmente, não garantem a qualidade para uso agrícola dos biossólidos, ou seja, elas devem ser aplicadas de forma associada.

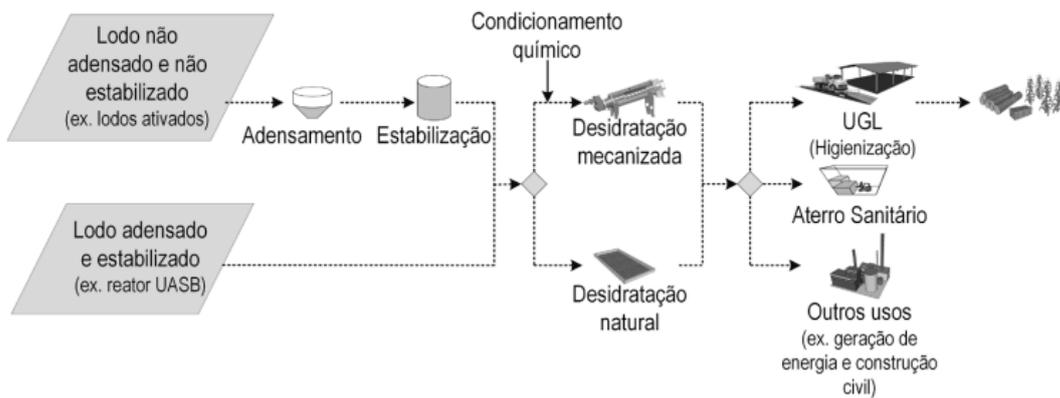
Quadro 1: Operações unitárias para tratamento do lodo e, conseqüentemente, geração de biossólidos.

	Objetivo	Tipos
Adensamento	Reduzir a quantidade de água presente no lodo por meios físicos.	Proporciona benefícios como redução do volume do tanque de armazenamento e equipamento de processamento.
Condicionamento	Processo para melhorar a separação das fases sólido-líquido do lodo. O condicionamento químico resulta na floculação das partículas.	Utilizam compostos inorgânicos (cal, cloreto férrico, sulfato ferroso, sulfato de alumínio) e/ou polímeros (sais de ferro).
Desaguamento	Consiste na separação do material sólido-líquido presente no lodo.	Secagem natural ou métodos mecânicos.
Secagem Térmica	Reduzir o teor de umidade do lodo através da aplicação de calor para evaporação da água.	Secadores diretos, secadores indiretos, secadores infravermelhos.
Estabilização Biológica	Minimizar os microrganismos patogênicos e reduzir, eliminar ou inibir o potencial de putrefação do lodo e da produção de odores.	Compostagem, estabilização alcalina, digestão aeróbia, digestão anaeróbia.

Fonte: Adaptado, Lopes (2019).

Visando adequar esse lodo para a sua apropriada destinação final, reduzindo certos inconvenientes, como a transmissão de doenças, o lodo é submetido a processos de tratamento físicos, químicos e, ou, biológicos. De acordo com estudos dos autores Andreoli e Ferreira (2001), o resíduo necessita passar por algumas etapas de gerenciamento que são elas: adensamento, estabilização, desidratação, higienização e disposição final. Existem alguns tipos de higienização mais utilizadas que são a digestão aeróbia, digestão anaeróbia, estabilização alcalina, compostagem e a secagem térmica.

Figura 1: Principais etapas e alternativas para o gerenciamento do lodo gerado em ETEs



Fonte: ABES (2021).

Todos os tipos de higienização têm um objetivo em comum que é a obtenção de um produto cuja destinação possa ser realizada adequadamente. Com o grande aumento populacional e conseqüentemente, a grande geração de lodo de esgoto, essa destinação final ficou cada vez mais difícil em questão de transporte e valor, aumentando a possibilidade de tornar a própria ETE como destinação final ou em áreas circunvizinhas. Sobre o tratamento e destinação final, existem algumas opções, sendo a digestão anaeróbia seguida da destinação final em aterros sanitários a mais comum; a incineração e a reciclagem agrícola são opções menos utilizadas. (MAGALHÃES, 2012).

Segundo Bettiol e Camargo (2001), a disposição final apropriada de lodo de esgoto é uma etapa complexa no processo operacional de uma Estação de Tratamento de Esgoto, levando em consideração que após um tratamento convencional do esgoto, o lodo ainda pode apresentar microrganismos patogênicos e características físico-químicas indesejadas.

Os principais destinos do lodo proveniente de ETEs são aterros sanitários, uso agrícola e incineração, representando um percentual aproximadamente de 90 % da destinação total (IWAKI, 2017). Porém, no Brasil, ainda se utilizam poucas técnicas alternativas para disposição, destinando grande parte do seu lodo para aterros sanitários, apesar da aplicação em agricultura estar crescendo muito nos últimos anos, além de ser considerada uma destinação final sustentável pela reciclagem de nutrientes (DUARTE, 2008).

3.3 Conceito de economia circular e aproveitamento dos subprodutos das ETEs

Segundo, Adriano Gama (2019) Economia Circular é o processo em que um produto fabricado adquirido pelos consumidores é utilizado até o seu limite. É uma proposta para reconsiderar a forma de produção, comercialização tradicional e assegurar o uso sustentável dos recursos naturais, buscando a máxima “Eficiência Energética”. O seu principal objetivo é que um certo produto seja utilizado ao máximo de maneira que alcance o limite de sua utilidade, visando minimizar os impactos causados pelos seres humanos no meio ambiente.

Um setor que vem se destacando bastante no quesito de economia circular é o de Saneamento, principalmente na área de Tratamento de Esgoto através da destinação e criação de novas rotas para o resíduo sólido, como o lodo de esgoto. Levando em consideração a reutilização do lodo de esgoto, que é instrumento deste trabalho, a utilização do biossólidos na agricultura é considerado um método bastante sustentável pelo fato de substituir fertilizantes industriais e reduzir a destinação desse resíduo para um aterro sanitário. (GAMA, 2019)

Outro motivo extremamente pertinente para a utilização do biossólido na agricultura é o fato de atender o segundo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), que tem como meta de acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.

3.4 Características físico-químicas e microbiológicas do lodo

Segundo Andreoli (1999), o esgoto sanitário é constituído de mais de 99,9% de água e apenas 0,1% sólido. Desses 0,1% de sólidos, 70% são orgânicos, como proteínas, carboidratos e gorduras e 30% inorgânicos, principalmente areia, sais e metais. Para determinação da melhor disposição final do lodo é necessário conhecer suas características físico-químicas e microbiológica.

As características físico-químicas de lodos dependem da composição das águas residuais e dos processos empregados para o tratamento. Essas características consistem nos parâmetros que indicam estabilização do lodo e caracterização do seu potencial agrônomo. Geralmente as características físico-químicas do lodo são os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), umidade, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total, temperatura, pH, nutrientes (P, K, Mg, Na, Ca, Mn) e metais pesados (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn).

Quanto às características microbiológicas, os microrganismos patogênicos são os organismos de maior interesse, pois são capazes de causar doenças ao homem e aos animais por várias vias de infecção como a ingestão, a inalação e o contato dérmico (AGUSTINI; ONOFRE, 2007).

Na Tabela 1 são apresentados os principais grupos de microrganismos que podem ser encontrados no lodo de esgoto in natura e biossólidos após digeridos ou tratados higienizados com a adição de cal.

Tabela 1: Organismos identificados em biossólidos e lodos de esgotos sanitários.

Microrganismo	Lodos de esgoto ^(a)	Biossólidos	
		Digerido ^(b)	Caleado
Coliformes termotolerantes ^(c)	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁵ - 10 ⁷	10 ² (g)
<i>Escherichia coli</i> ^(c)	10 ⁵ - 10 ⁷	10 ³ - 10 ⁶ (h)	1-10 ² (g)
<i>Salmonella spp.</i> ^(c)	10 ² - 10 ⁴	1-10	ND(i)- 0,1(j)
Vírus entéricos ^(d)	10 ² - 10 ³	1-10	0,1-1
Rotavírus ^(d)	10-10 ³	-	-
Ovos de helmintos ^(e)	10-10 ²	0,3-13	ND(i)-2(g)
<i>Giardiaspp.</i> ^(f)	10 ²	0,5	-
<i>Cryptosporidium spp.</i> ^(f)	10-10 ³	1-10	0,1-1

Fonte: Adaptado, Bastos *et al.* (2009).

Notas: (a) lodo primário, secundário ou de reator UASB, sem tratamento; (b) digestão aeróbia ou anaeróbia mesofílica; (c) NMP/g ST; (d) Unidade formadora de placa (UFP)/g ST; (e) ovos/g MS; (f) (oo)cistos/g ST; (g) 20-60 dias após aplicação de cal a 40-50% do peso seco, pH≈12; (h) estimado assumindo remoção de 2log₁₀; (i) não detectado; (j) considerando remoção de 5 log₁₀.

3.5 Doenças transmitidas pelo solo

Os quatro maiores grupos de organismos patogênicos que afetam a saúde humana, as bactérias, os vírus, os protozoários e os helmintos estão presentes no lodo de esgoto numa densidade que depende do quadro epidemiológico da comunidade local e do tratamento dado ao esgoto e ao lodo numa ETE (CARRINGTON, 2001).

Dentre os microrganismos presentes no lodo de esgoto, os ovos de helmintos são a principal preocupação biológica quando se pretende a reutilização de lodo para a produção agrícola (NAVARRO *et al.*, 2009).

No Quadro 2 estão os principais helmintos encontrados em esgoto doméstico e as doenças associadas. Importante observar que os helmintos necessitam de apenas um ovo viável (ovo embrionado, para uns, e larvas filarióides, para outros) para ocasionar uma infecção, constituindo assim um grave problema de saúde pública (CARRIJO; BIONDI, 2008).

Quadro 2: Os principais helmintos encontrados em águas residuais e as doenças relacionadas.

Grupo de helmintos	Organismo	Doenças
Cestóides (tapeworm)	<i>Taenia saginata</i>	Tênia da carne bovina
	<i>Taenia solium</i>	Tênia da carne suína
Ancilostomídeos (Hookworms)	<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ancilostomose
	<i>Necator americanus</i>	
Nematóides (roundworms)	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariíase
	<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuríase
Trematóides (flukes)	<i>Schistosoma mansoni</i>	Esquistossomose

Fonte: Adaptado, Gerardi e Zimmerman (2004).

3.6 Avaliação de riscos microbiológicos (AQRM)

A avaliação de risco é a caracterização qualitativa ou quantitativa e estimativa de potenciais efeitos adversos à saúde associados à exposição de indivíduos ou populações a perigos (materiais, físicos, químicos, e/ou agentes microbianos). A avaliação de risco é interdisciplinar por natureza e inclui a participação de muitas disciplinas (por exemplo, economia, engenharia, matemática, política e ciências sociais, bem como várias ciências naturais). O desenvolvimento da AQRM tem sua origem no quadro de risco químico associado à poluição (HAAS et al., 2014).

A AQRM é a aplicação de princípios de avaliação de risco para a estimativa das consequências de uma exposição planejada ou real a microrganismos infecciosos. A partir dessa ferramenta, o avaliador de risco pode ter as melhores informações disponíveis (como relações dose-resposta, magnitudes de exposição) para compreender a natureza dos efeitos potenciais de uma exposição microbiana. Uma vez que tais informações são quase invariavelmente incompletas, também é necessário determinar o erro potencial envolvido na avaliação de risco. Um efetivo estudo de AQRM possibilita a tomada de decisões e medidas necessárias para mitigar, controlar ou se defender contra tais exposições (HAAS et al., 2014).

A AQRM é uma ferramenta aplicada em quatro etapas: (i) formulação do problema / identificação do perigo; (ii) avaliação da exposição; (iii) avaliação da dose-resposta; e (iv) caracterização do risco, que serão descritas a seguir (WHO, 2016).

A primeira etapa, formulação do problema e identificação do perigo, o contexto geral (patógenos de referência, vias de exposição, eventos perigosos e resultados de saúde de interesse) da avaliação de risco é definido e há um direcionamento para a questão específica de gerenciamento de risco de interesse. No caso em estudo, consiste na definição do agente patogênico de interesse presente no bio sólido que oferece riscos à saúde humana, por exemplo.

Já na segunda etapa, avaliação da exposição, estima-se a dose média de microrganismos ingerida a partir de cada evento de exposição e concentração do microrganismo, assim como a frequência e duração das prováveis vias de exposição.

A avaliação da dose-reposta, que corresponde a terceira etapa, relaciona a dose do agente microbiológico decorrente de uma única exposição com o risco de uma resposta adversa infecciosa no indivíduo.

Na quarta e última etapa da AQRM, são estimados, quantitativamente e em termos probabilísticos, os riscos decorrentes da exposição continuada a determinado agente microbiano, baseando-se na frequência da exposição durante um período de tempo de até um ano, considerando o risco de infecção em uma única exposição (DIAS, 2012; HAAS et al., 1999; MAGALHÃES, 2012).

E assim a AQRM tornou-se um dos métodos primordiais para identificar os riscos de infecção para os diferentes microrganismos. Navarro et al. (2009) estabeleceram um modelo para avaliação de risco de infecção pela exposição a helmintos (*Ascaris lumbricoides*), devido a safras cultivadas em solo enriquecido com bio sólidos.

Outros estudos se sucederam e a AQRM é apontada como uma ferramenta imprescindíveis para se quantificar os riscos de infecção que devem ser considerados ao se propor normas e regulamentos que estabeleçam valores máximos permitidos (VMP) para os diferentes microrganismos presentes em água potável e em águas de reúso para fins não potáveis.

3.7 Padrões para uso dos biossólidos

3.7.1 Padrões Internacionais

A U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency), em 1993 estabeleceu critérios para uso agrícola de lodo de esgotos, nos Estados Unidos, por meio da “Norma 503”. De acordo com essa norma, as exigências e restrições para aplicação no solo dependem da qualidade do biossólido, definida em duas categorias: Classe A e Classe B. (U.S. EPA, 1993).

Para a formação de biossólidos Classe A, o lodo deve ser submetido a Processos de Redução Adicional de Patógenos (PRAP), alcançando, entre outros critérios, um padrão de qualidade microbiológica de concentração de ovos viáveis de helmintos menor que um ovo por 4 gramas de sólidos totais (< 1 ovo / 4g ST).

Por outro lado, para a produção de biossólidos Classe B, o lodo deve ser tratado por Processos de Redução Significativa de Patógenos (PRSP), porém, não é especificado o padrão de qualidade microbiológica associado a ovos de helmintos para essa categoria. (MAGALHÃES, 2012; BASTOS *et al.*, 2013).

Os padrões adotados nas diretrizes da OMS em 2006 recomendou um critério de qualidade de concentração de < 1 ovo de helmintos por litro para águas residuais usadas para irrigação, e com respeito a lodos de esgoto, sugeriu um valor de concentração de 1 ovo de helminto por grama de sólidos totais (1 ovo / g ST) (BASTOS *et al.*, 2009; NAVARRO *et al.*, 2009; NAVARRO; JIMÉNEZ, 2011).

3.7.2 Padrões Nacionais

A primeira norma que definiu critérios para o uso do lodo no setor agrícola e florestal no Brasil, foi a Resolução do CONAMA n° 375 de 29 de agosto de 2006. Em 2020, uma nova resolução (n.º 498 de 19 de agosto de 2020) foi publicada pelo CONAMA, que revogou as Resoluções CONAMA n° 375/2006 e n° 380/2006.

Baseando-se nas concentrações de patógenos presentes no lodo de esgoto, a

Resolução CONAMA nº 498 de 19 de agosto de 2020 (CONAMA, 2020) define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos. Na Seção III dessa resolução classifica o bio sólido em classe A ou classe B.

Tabela 2: Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos

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

Fonte: CONAMA, 2020.

Notas: ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa

O Bio sólido Classe A exige a ausência de *Salmonella* em 10 gramas de sólidos totais (ST), número mais provável (NMP) de coliformes termotolerantes inferior a 1000, concentrações de ovos viáveis de helmintos menor que 1 por grama de sólidos totais (< 1 ovo / g ST) e as unidades formadoras de placa por vírus devem ser inferior a 0,25 por grama de sólidos totais, como mostra na Tabela 2. Com isso, a Resolução CONAMA 498/2020 limita que para o cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, não se deve aplicar o bio sólido um mês antes do período de colheita (CONAMA, 2020).

Já o Bio sólido Classe B considera apenas a presença máxima de 10⁶ NMP por grama de ST e de 10 ovos de helmintos por grama de sólidos totais, de acordo com a Tabela 2. Só podem ser aplicados em cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus, em produtos não alimentícios, pastagens, forrageiras e árvores frutíferas desde que sejam incorporados ao solo mecanicamente e que sejam obedecidas as restrições de colheita e de acesso público. Tais restrições também devem ser observadas para a categoria A (CONAMA, 2020).

Para produção de bio sólidos Classe A e Classe B, a Resolução 498/2020 estabelece que o lodo deve ser submetido aos mesmos processos de tratamento citados na Norma 503 da U.S. EPA (1993), ou seja, respectivamente, PRAP (Processos de Redução Adicional de Patógenos) e PRSP (Processos de Redução Significativa de Patógenos).

3.7.3 Análise crítico-comparativa

De acordo com as regulamentações apresentadas anteriormente, podemos ter diferentes pontos de vista no que diz respeito aos limites de concentração de ovos de helmintos para utilização de biossólidos.

Do ponto de vista de controle de riscos microbiológicos, essas três regulamentações assumem a abordagem de dupla barreira de proteção à saúde (tratamento do lodo e restrições de uso de biossólidos), estabelecendo dois níveis de qualidade de biossólidos, para os quais são indicadas diferentes restrições de aplicação (DIAS, 2012; BASTOS *et al.*, 2013).

Para uma melhor compreensão, foram dispostos na Tabela 3 os valores das concentrações adotadas como padrão de qualidade nos documentos abordados acima.

Tabela 3: Limites de concentrações de ovos de helmintos para utilização de biossólidos, conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a Organização Mundial da Saúde e o Conselho Nacional de Meio Ambiente do Brasil.

Norma 503, U.S. EPA (1993)		Diretrizes daOMS (2006)	Resolução CONAMA 498/2020	
Classe A	Classe B		Classe A	Classe B
< 1 ovo/4g ST	Não especificado	1 ovo/g ST	< 1 ovo/g ST	Não especificado

Fonte: U.S. EPA (1993); WHO (2006a) e CONAMA (2020).

Notas: g ST = grama de sólidos totais.

4 METODOLOGIA

4.1 Dados secundários de lodo de esgoto e biossólido para aplicação da AQRM

A presente pesquisa utilizou dados secundários de Ovos de Helmitos de pesquisa realizada por Santos et al. (2017), na qual os autores caracterizaram o lodo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) da ETE de Feira de Santana-BA.

Estes mesmos dados serviram de referência para o estudo de Melo (2021) que avaliou os riscos de infecção por helmintos (*A. lumbricoides*) para os consumidores de hortaliças cultivadas em solo enriquecido com lodo de esgoto e biossólidos. Assim, o estudo em tela dará continuidade e complementarará o trabalho desenvolvido por Melo (2021).

4.2 Descrição da ETE

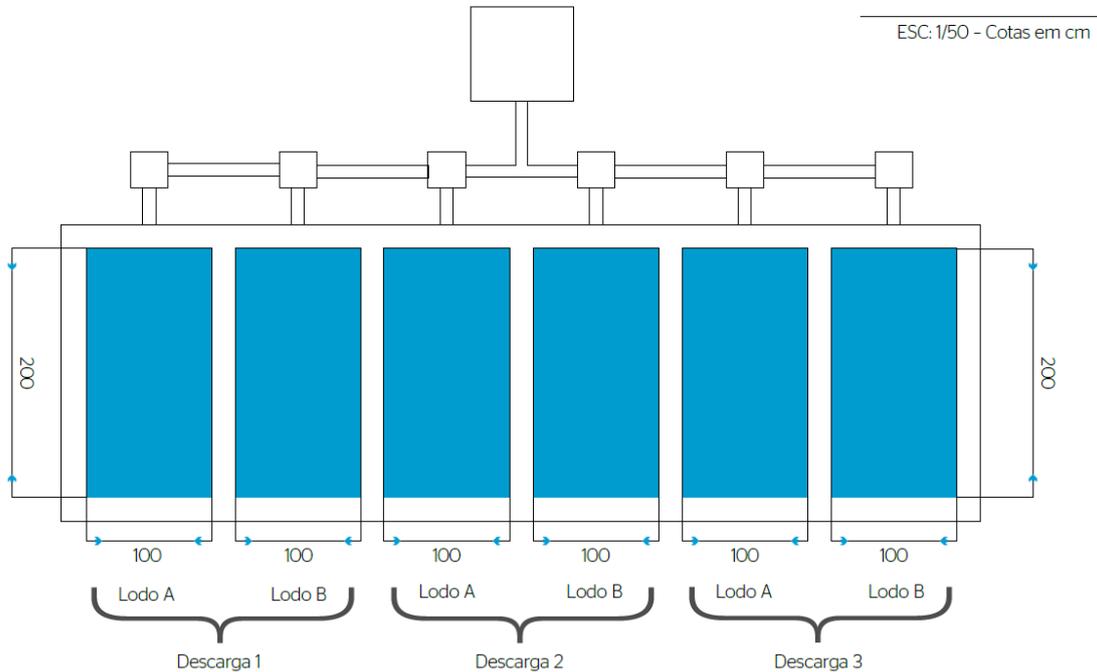
O lodo utilizado neste trabalho é oriundo do reator UASB de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em Feira de Santana-BA, que possui 12 m de largura, 12 m de comprimento e 5 m de altura. Os lodos utilizados para caracterização no estudo foram retirados em dois pontos distintos do reator (chamados de ponto A e B).

O primeiro ponto de coleta foi do leito de lodo, a 4,8 m de profundidade (lodo A), e o segundo foi da região da manta de lodo, a 3,1 m de profundidade (lodo B). Primeiramente, esse lodo foi retirado por uma bomba de sucção e transportado em caminhões limpa-fossa até o ponto de tratamento. Foram realizadas três descargas do ponto A e três descargas do ponto B, e cada uma delas foi encaminhada para uma célula de leito de secagem em escala-piloto, totalizando seis leitos (Figura 2). As descargas ocorriam com intervalo de um mês entre elas, sendo que a primeira ocorreu após seis meses de funcionamento do reator, que iniciou a operação sem inóculo (SANTOS et al., 2017).

Como Santos et al. (2017) afirmaram que não houve diferença físico-química, microbiológica e parasitológica significantes entre eles, de acordo com a análise estatística dos resultados obtidos, foi admitido apenas os dados do ponto B, coletado a

3,1 m de profundidade do reator UASB. Isso foi determinado pelo fato da região de coleta do lodo A (leito) obter um maior fluxo de material e de concentrações de sólidos, visto que o reator é de fluxo ascendente, comparado à região de coleta do lodo B (manta).

Figura 2: Disposição das descargas e dos leitos de secagem no sistema experimental



Fonte: SANTOS *et al.* (2017).

As células do leito de secagem (Figura 1) apresentavam dimensões 1,00 x 2,00 x 0,50 m, com área superficial de 2 m², fundo com declividade em direção à tubulação de coleta do líquido percolado e camadas drenantes. Foi coletado aproximadamente 1,2 m³ de lodo em cada ponto do UASB, sendo que 1 m³ foi despejado na célula de leito. Durante todo o experimento os leitos permaneceram sem cobertura, a fim de simular as mesmas condições de secagem da ETE (SANTOS *et al.*, 2017).

4.3 Dados utilizados

Foram realizadas 6 coletas de cada célula de leito durante 90 dias (nos tempos 0, 7, 15, 30, 60 e 90 dias). Na Tabela 4 estão representadas as concentrações de ovos viáveis de helmintos no início e no final do período de secagem. Como comentado anteriormente, só será considerado o lodo do ponto B. A partir dos resultados encontrados, observou-se

que as eficiências de remoção de ovos viáveis foram semelhantes entre os tratamentos: 97,37 e 99,69%, para os lodos A e B, respectivamente. A temperatura de 30°C e a elevada umidade (mais de 90%) do lodo na fase inicial podem ter favorecido a maturação e eclosão dos ovos de helmintos, reduzindo sua concentração ao final do processo.

Tabela 4: Médias e desvios padrão da concentração de ovos viáveis de helmintos/g de sólidos totais no ponto de descarga B.

Ponto de descarga	Tempo (dias)	Número de ovos viáveis de helmintos. g ⁻¹ de sólidos totais
B	0	141,21±216,64
	90	0,44±0,77

Fonte: SANTOS et al., 2017.

4.4 População alvo: trabalhadores rurais

Esse trabalho visa analisar a possibilidade de transmissão de patógenos a partir da exposição de trabalhadores rurais de pequenas propriedades, cuja aplicação dos biossólidos ocorre de forma manual, sem uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), para culturas de alface e cenoura.

Os cenários avaliados foram: (i) riscos aos agricultores durante a aplicação do biossólido (cenário 1) e (ii) riscos para os trabalhadores envolvidos no manejo do sistema solo-planta (cenário 2).

Vale resaltar que segundo a NR31, o trabalho rural necessitam utilizar equipamentos de proteção. Máscara de proteção, luvas de proteção, óculos de segurança, Macacão de segurança, avental, botas são alguns dos equipamentos exigidos pela norma para assegurar a integridade física e saúde desses trabalhadores.

4.5 Aplicação da AQRM

4.5.1 Identificação do perigo

A primeira e determinante para as outras etapas, a identificação do perigo é um processo predominantemente qualitativo destinado a identificar o(s) microrganismo(s) preocupante(s) e as consequências causadas ao hospedeiro após a infecção (WHO, 2012).

O microrganismo avaliado foi *Ascaris lumbricoides* que representam 90% dos helmintos em alimentos cultivados com bioossólidos (JIMENEZ et al., 2006; NAVARRO et al., 2009).

4.5.2 Avaliação da exposição

Nesta etapa estima-se a quantidade de microrganismos ingerida (dose) por rota e frequência de exposição, nos dois cenários considerados: (i) aplicação de bioossólidos (Equação 1) e (ii) manejo do sistema solo-planta (Equação 2).

$$d = C \times Mbios \quad (\text{Equação 1})$$

$$d = C \times F \times D \times Msolo \quad (\text{Equação 2})$$

d: dose de patógenos ingerida a cada evento de exposição;

C: concentração de microrganismo no bioossólido (em ovos viáveis / g bioossólidos). Considerou-se que a concentração de *A. Lumbricóides* é 90% da concentração de ovos viáveis de helmintos;

F: fator de diluição do bioossólido no solo (g bioossólido / g solo). É determinado em função das necessidades nutricionais de cada cultura, que, segundo Novais (2010) e Ribeiro et al. (1999) apud Magalhães (2012), é igual a 0,00315 e 0,00255 (g bioossólido/g solo), respectivamente, para alface e cenoura;

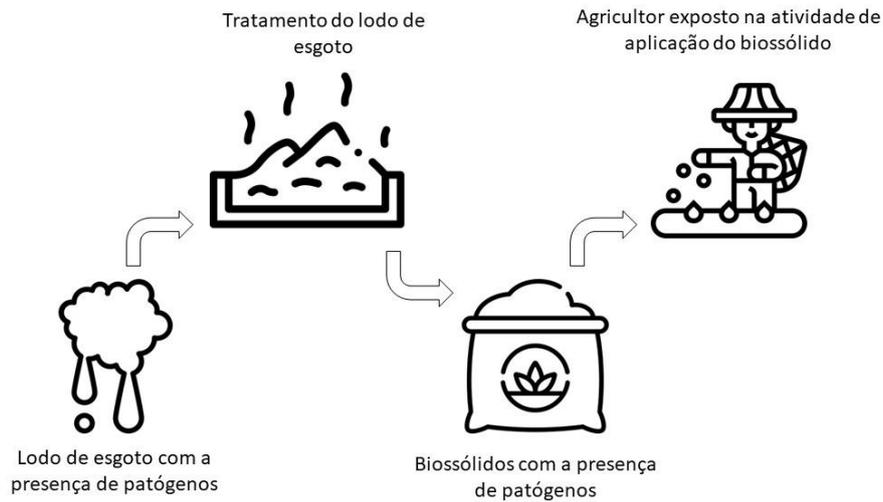
D: decaimento dos patógenos no solo: Não foi considerado nos cálculos da dose infectante uma vez que o ciclo de cultivo da alface (50 a 80 dias) e da cenoura (85 a 110 dias) são muito curtos em relação ao período que os ovos de *Ascaris lumbricoides* podem permanecer infecciosos, ou seja, 2 a 7 anos, o que torna irrelevante a taxa de decaimento para os cálculos (USEPA, 2003; BASTOS et al., 2009; MAGALHÃES, 2012);

Mbios: ingestão involuntária de bioossólidos pelos trabalhadores durante a aplicação. Foi assumido ser de 10 a 150 mg. d⁻¹ (MAGALHÃES, 2012);

Msolo: ingestão acidental de partículas de solo pelos trabalhadores durante o cultivo (manejo solo-planta). Foi assumido ser de 50 a 150 mg de solo por evento de exposição (MAGALHÃES, 2012).

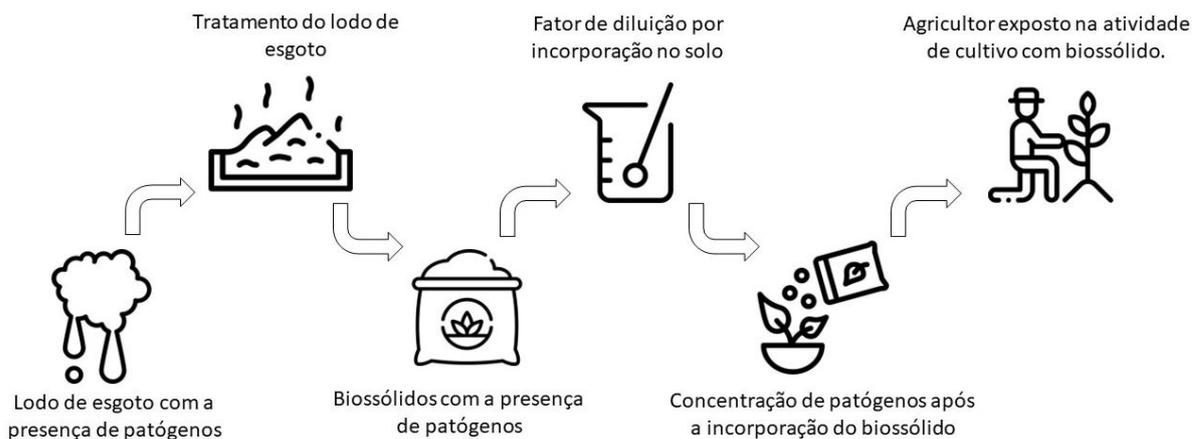
As Figuras 2 e 3 ilustram os fatores que interferem nos dois cenários de exposição.

Figura 3: Esquema representativo do modelo de exposição relativo ao cenário 1, de ingestão de partículas de biossólidos durante atividades de adubação.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 4: Esquema representativo do modelo de exposição relativo ao cenário 2, de ingestão de partículas de partículas de solo durante atividades de manejo dos cultivos após incorporação de biossólidos.



Fonte: Autora, 2022.

4.5.3 Avaliação da dose-resposta

Os modelos de análise dose-resposta, são funções matemáticas que fornecem a probabilidade de ocorrência de um determinado efeito adverso. Tal análise é realizada pelo modelo Beta-Poisson (Equação 3), amplamente empregado na caracterização de risco de *Ascaris lumbricoides* (NAVARRO et al., 2009). O modelo é descrito por dois

parâmetros base, a dose infectante média (N_{50}) e o parâmetro de decaimento α . A dose infectante também pode ser representada pela Equação 4, em função de uma constante de proporcionalidade β .

$$P_i = 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{N_{50}} \right) \times \left(2^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right) \right]^{-\alpha} \quad (\text{Equação 3})$$

$$P_i = 1 - \left(1 + \frac{d}{\beta} \right)^{-\alpha} \quad (\text{Equação 4})$$

Pi: probabilidade de infecção para uma única exposição; d: dose ou número de patógenos ingeridos; N_{50} : dose infectante média; α e β : parâmetros dose-resposta, característicos da interação agente–hospedeiro. Navarro et al. (2009) propuseram o ajuste de modelos Beta-Poisson a dados de dose-resposta de helmintos ($N_{50} = 859$; $\alpha = 0,104$; $\beta = 1,096$).

4.5.4 Caracterização do risco

Nesta etapa, determina-se o risco para múltiplas exposições durante o período de um ano (Equação 5).

$$P_n = 1 - (1 - P_i)^n \quad (\text{Equação 5})$$

Pn: risco anual; Pi: probabilidade de infecção do trabalhador rural para uma única exposição (Equação 4); n: número de exposições no ano.

O período de um ano foi considerado para que os resultados obtidos com a AQRM possam ser comparados com os valores de referência da OMS, como visto a seguir.

4.6 Valor de referência

A carga de doença tolerável, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006), é de 10^{-6} DALY pppa (por pessoa por ano), e considera uma perda de $8,25 \times 10^{-3}$ DALY por casos de ascaridíase. Disability Adjusted Life Years (DALY), que significa “anos de vida perdidos ajustados por incapacidade”, é a métrica utilizada pela

OMS que permite transformar uma “incapacidade vivenciada” em “anos de vida saudáveis perdidos”, fornecendo um peso relativo diferente para patógenos com base na gravidade dos resultados da doença (WHO, 2016).

Para o presente estudo o risco tolerável de infecção por *Ascaris* é dado pela relação carga de doença tolerável ou DALY tolerável pela OMS (10^{-6}) / DALY por casos de ascaridíase ($8,25 \times 10^{-3}$). Assim, o risco tolerável será de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa (Equação 6). (MARA; SLEIGH, 2010).

$$A = \frac{DALY \text{ tolerável pppa (OMS)}}{DALY \text{ por casos de ascaridíase}} = \frac{10^{-6}}{8,25 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ pppa} \quad (\text{Equação 6})$$

4.7 Determinação dos Valores Máximos Permitidos de microrganismo

Tomando como referência o risco de infecção por *A. Lumbricoides* calculado no item anterior ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa), utilizou-se a AQRM de forma inversa para determinar os Valores Máximos Permitidos (VMP) de *áscaris* no biossólido.

Assim, o novo valor de riscos de uma única exposição (P_i') foi calculado considerando o risco anual aceitável ($P_n = 1,2 \times 10^{-4}$ pppa) (Equação 7).

$$P'_i = 1 - (1 - P_n)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Equação 7})$$

A partir daí, foi encontrada uma nova dose (d') com auxílio da Equação 8, onde β e α já são parâmetros conhecidos.

$$d' = \beta \times [(1 - P_i')^{\frac{-1}{\alpha}} - 1] \quad (\text{Equação 8})$$

A partir da dose encontrada (d'), por fim, foi determinada a concentração (C') de microrganismos para ser determinado o valor que resultaria em níveis de riscos toleráveis para o cenário 1 (Equação 9) e cenário 2 (Equação 10).

$$C' = \frac{d'}{M_{bios}} \quad (\text{Equação 9})$$

$$C' = \frac{d'}{D \times F \times M_{solo}} \quad (\text{Equação 10})$$

C': concentração tolerável de microrganismos no biossólido (ovos viáveis de *Ascaris* / g biossólidos); d': dose de patógenos tolerável ingerida a cada evento de exposição; D: decaimento dos patógenos no solo; F: fator de diluição do biossólido no solo (g biossólido/ g solo); e Mbios: ingestão involuntária de biossólidos pelos trabalhadores durante a aplicação (cenário 1); Msolo: ingestão acidental de partículas de solo pelos trabalhadores durante o cultivo (cenário 2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Dados de biossólidos a serem avaliados

Como mencionado no item 4.2, nesse estudo foram utilizados apenas os dados do lodo B do estudo de Santos et al. (2017), conforme Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Médias e desvios padrões da concentração de ovos viáveis de helmintos. g-1 de sólidos totais.

Ponto de descarga	Tempo (dias)	Número de ovos viáveis de Helmintos/g de sólidos totais
C ₀	0	141,21±216,64
C ₉₀	90	0,44±0,77

Fonte: Adaptado, SANTOS et al., 2017.

Na tabela acima estão expostas as concentrações de ovos viáveis de helmintos no início (C₀), ou seja, é o lodo *in natura*, e no final do período (C₉₀) gerado após tratamento em leitos de secagem. Como o microrganismo *Ascaris lumbricoides* representa cerca 90% dos helmintos em alimentos cultivados com biossólidos (JIMENEZ et al., 2006; NAVARRO et al., 2009), foi considerado 90% das concentrações médias do número de ovos de helmintos nas amostras de lodo no tempo inicial (C₀) e no tempo final (C₉₀), após 90 dias de secagem em leito (Tabela 6).

Tabela 6: Concentrações de ovos viáveis de *Ascaris* por grama de sólidos totais utilizadas na aplicação da AQRM.

Ponto de descarga	Tempo (dias)	Número de ovos viáveis de Helmintos/g de sólidos totais	Número de ovos viáveis de <i>Ascaris</i> /g de sólidos totais
C ₀	0	141,21	127,09
C ₉₀	90	0,44	0,40

Fonte: Adaptado, SANTOS et al., 2017.

5.2 Análise quantitativa de risco microbiológico

5.2.1 Identificação do perigo

Os microrganismos escolhidos para serem avaliados foram os helmintos (*Acaris lumbricoides*), princilpamnete por serem agente patogênico de interesse presente no

biossólido, oferecendo riscos à saúde humana após a infecção, por sua grande resistência no biossólido e por sua baixa dose infectante.

5.2.2 Avaliação da exposição

Após ter obtido os valores da concentração de ovos de helmintos, tanto no lodo *in natura* (C_0) quanto no biossólido (C_{90}), foi necessário estimar a quantidade de microrganismos ingerida (dose) por rota de exposição, no cenário 1 (aplicação de biossólidos - Equação 1), e no cenário 2 (manejo do sistema solo-planta - Equação 2) das culturas de cenoura e alface. Ambas equações foram apresentadas no item 4.5.2. Os resultados estão indicados nas Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7: Avaliação da exposição na aplicação de lodo/biossólido no solo

Avaliação da exposição – Cenário 1				
Aplicação do biossólido/lodo	Lodo/Biossólido	C (Ovos viáveis de Ascaris/g ST)	M _{bioss} (g ST)	d (Ovos viáveis de Ascaris)
	C_0	127,09	0,08	1,02E+01
	C_{90}	0,40		3,17E-02

ST: sólidos totais

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 8: Avaliação da exposição no manejo das culturas de alface e cenoura

Avaliação da exposição – Cenário 2						
Manejo da cultura (Alface)	Lodo/Biossólido	C (Ovos viáveis de Ascaris/g ST)	F (g biossólido/g solo)	D	M _{solo} (g)	d (Ovos viáveis de Ascaris)
	C_0	127,09	0,00315	1	0,1	4,00E-02
	C_{90}	0,40				1,25E-04
Manejo da cultura (Cenoura)	Lodo/Biossólido	C	F	D	M _{solo} (g)	d
	C_0	127,09	0,00255	1	0,1	3,24E-02
	C_{90}	0,40				1,01E-04

ST: sólidos totais

Fonte: Autora, 2022.

De acordo com os resultados apresentados, o tratamento do lodo em leito de secagem apresentou eficiência de 99,7%, o que irá impactar nos riscos microbiológicos associados ao uso desses materiais.

Nas Tabela 7 e Tabela 8 foram encontrados os valores das doses (d) de patógenos ingeridas a cada evento de exposição para cada um dos cenários. O dado (C) é a concentração de microrganismo no biossólido (em ovos viáveis / g biossólidos), considerando que a concentração de *A. Lumbricoides* é 90% da concentração de ovos viáveis de helmintos, como mostra na (Tabela 6).

O dado (Mbios) ingestão involuntária de biossólidos pelos trabalhadores rurais durante a aplicação, foi assumido como a média de 10 a 150 mg. d⁻¹, ou seja 0,08 g.d⁻¹. (MAGALHÃES, 2012).

O valor de (F) é correspondente ao fator de diluição do biossólido no solo (g biossólido / g solo), que de acordo com estudos de Novais (2010) e Ribeiro et al. (1999) apud Magalhães (2012), é igual a 0,00315 e 0,00255 (g biossólido/g solo), respectivamente, para alface e cenoura.

O valor de (D) é correspondente ao decaimento dos patógenos no solo, o qual não foi considerado nos cálculos da dose infectante uma vez que o ciclo de cultivo da alface e da cenoura são muito curtos em relação ao período que os ovos de *Ascaris lumbricoides* permanecem no solo (USEPA, 2003; BASTOS et al., 2009; MAGALHÃES, 2012).

E por fim, o dado (Msolo) é a ingestão acidental de partículas de solo pelos trabalhadores durante o cultivo (manejo solo-planta). Foi assumido a média de 50 a 150 mg de solo por evento de exposição, ou seja (0,1 g de solo) (MAGALHÃES, 2012).

Como é possível observar, a maior dose ingerida foi de 10,2 ovos de *Ascaris*, que corresponde à aplicação do lodo C₀ (*in natura*), onde o agricultor vai entrar em contato direto com o material sem tratamento. Já a menor dose contaminante encontrada foi de 1,01x10⁻⁴ ovo de *Ascaris*, que é referente à aplicação do biossólido C₉₀ (tratado) no manejo da cenoura.

Para o mesmo tipo de material (C₀ ou C₉₀), o fator de diluição diferenciado entre as culturas, em função das respectivas necessidades nutricionais, irá determinar a maior ou menor dose ingerida, uma vez que a ingestão acidental (Msolo) não difere entre as culturas, e o decaimento dos microrganismos no solo durante os ciclos da alface e cenoura, foi desconsiderado. Como a alface exige maior quantidade de nutrientes

fornecida pelo lodo/biossólido, o que implica em maior quantidade de material aplicada, as doses ingeridas pelos trabalhadores rurais durante o manejo da cultura de alface são cerca de 23,7% maiores que durante o cultivo de cenoura.

5.2.3 Avaliação da dose-resposta

Para determinação dos valores da probabilidade de infecção para uma única exposição (Pi), foi necessário utilizar modelos matemáticos de análise dose-resposta. Tal análise é realizada a partir da Equação 4, como indicado no item 4.5.3.

Na Tabela 9 estão expostos dados de (Pi) para cada um dos cenários. A dose infectante (d), que é o número de patógenos ingeridos foi encontrada anteriormente, como mostram as Tabela 7 e Tabela 8. E por fim, os parâmetros dose-resposta ($\alpha = 0,104$; $\beta = 1,096$), característicos da interação agente–hospedeiro, são constantes encontrados a partir de experimentos epidemiológicos (NAVARRO et al., 2009).

O maior valor encontrado de probabilidade de infecção para uma única exposição foi de 0,21 (por pessoa por dia), que corresponde à aplicação do biossólido C₀ (*in natura*). Já o menor valor encontrado de probabilidade de infecção para uma única exposição, correspondente à menor dose contaminante encontrada, foi de $9,58 \times 10^{-6}$ (por pessoa por dia), que é referente ao biossólido C₉₀ (tratado), durante o manejo da cenoura.

Tabela 9: Avaliação da dose-resposta para aplicação e manejo da alface e da cenoura

Avaliação da dose – resposta (Cenário 1)					
Aplicação do biossólido	Biossólido	α	β	d	Pi (pppd)
	C ₀	0,104	1,096	1,02E+01	2,15E-01
	C ₉₀			3,17E-02	2,96E-03
Avaliação da dose – resposta (Cenário 2)					
Manejo da cultura (Alface)	Biossólido	α	β	d	Pi (pppd)
	C ₀	0,104	1,096	4,00E-02	3,72E-03
	C ₉₀			1,25E-04	1,18E-05
Manejo da cultura (Cenoura)	Biossólido	α	β	d	Pi (pppd)
	C ₀	0,104	1,096	3,24E-02	3,03E-03
	C ₉₀			1,01E-04	9,58E-06

pppd: por pessoa por dia

Fonte: Autora, 2022.

Fica evidente que, para um único evento de exposição, a atividade de aplicação de bio sólidos, ou seja, a preparação do solo para o plantio implica em maiores riscos aos trabalhadores rurais, lembrando que não está sendo considerado o uso de EPIs.

5.2.4 Caracterização do risco anual de infecção

Na Tabela 10 são apresentados os dados que determinam o risco para múltiplas exposições durante o período de um ano, que foi encontrado com auxílio da Equação 5 que foi mencionada no item 4.5.4.

Tabela 10: Caracterização do risco anual

Caracterização de risco – Cenário 1				
Aplicação do bio sólido	Bio sólido	n (dia)	Pi (pppd)	Pn (pppa)
	C ₀	75	2,15E-01	1,00E+00
	C ₉₀		2,96E-03	1,99E-01
Caracterização de risco – Cenário 2				
Manejo da cultura (Alface)	Bio sólido	210	Pi (pppd)	Pn (pppa)
	C ₀		3,72E-03	5,43E-01
	C ₉₀		1,18E-05	2,48E-03
Manejo da cultura (Cenoura)	Bio sólido	210	Pi (pppd)	Pn (pppa)
	C ₀		3,03E-03	4,71E-01
	C ₉₀		9,58E-06	2,01E-03

pppd: por pessoa por dia; pppa: por pessoa por ano

Fonte: Autora, 2022.

Para obter os valores de risco anual (Pn), foi necessário utilizar os dados já encontrados anteriormente de probabilidade de infecção do trabalhador rural para uma única exposição (Pi) e a frequência de exposições no ano (d).

Para a atividade de aplicação do bio sólido foi assumido n = 75 dias, que é a média do período de atividade de uma a duas vezes por semana (aproximadamente 50 a 100 dias por ano), com ingestão acidental de partículas de bio sólidos de 10 a 150 mg/d no caso de aplicação manual e de 1 a 10 mg/ quando da aplicação é mecanizada (MAGALHÃES, 2012).

Já para a atividade de manejo durante o cultivo da alface e da cenoura foi assumido um valor de n = 210 dias, que é a média que um trabalhador estaria sujeito à ingestão de 50 a 150 mg de solo por evento de exposição, sendo exposto de 3 a 5 dias por semana, ou seja, 160 a 260 dias por ano (MAGALHÃES, 2012).

De acordo com os dados apresentados, todos os cenários de exposição resultaram em riscos anuais de infecção por helmintos acima do aceitável pela OMS, ou seja $1,2 \times 10^{-4}$ pppa. Os elevados riscos associados ao microrganismo alvo, deve-se, em parte, a baixa dose de infectante, conforme destacado por Magalhães (2012). O autor avaliou ainda, que o intervalo entre a aplicação e o cultivo, de 4 a 6 meses, pode diminuir consideravelmente os riscos de infecção, por exemplo para *Salmonella*, rotavírus, *Cryptosporidium parvum* e *Giardia*, mas que não é o caso de *Ascaris lumbricoides*.

Estudo realizado por Krzyzanowski Jr. et al. (2016) sobre uso agrícola de biossólidos, com aplicação da AQRM relativos a *Salmonella*, evidenciou que para os trabalhadores rurais, os maiores riscos anuais de infecção foram encontrados quando da aplicação do lodo de esgoto em solos agrícolas. Os autores concluíram, por meio de análise de sensibilidade dos dados obtidos, que dentre os parâmetros simulados para o risco anual de infecção por *Salmonella spp.* para trabalhadores, a concentração de microrganismos e a taxa de ingestão involuntária de biossólidos foi mais significativa que o fator de diluição do biossólido no solo e o decaimento de *Salmonella ssp.* no solo.

5.3 Determinação dos Valores Máximos Permitido das concentrações de *Ascaris lumbricoides* no biossólido para atender aos riscos toleráveis

Além de ser identificadas concentrações de microrganismos que podem trazer risco à saúde humana, a ferramenta AQRM ainda auxilia na definição de valores máximos permitidos (VMP) de microrganismos de acordo com a legislação. No Brasil, não há valor de referência para riscos aceitáveis de infecção, razão pela qual, foi adotado o padrão da OMS, conforme comentado do item 4.6.

A concentração tolerável de ovos de helmintos no biossólido é encontrada de forma inversa ao que realizamos até o momento, como demonstrado nas Tabela 11 e Tabela 12, respectivamente para os cenários 1 e 2.

Tabela 11: Concentrações toleráveis de *A. lumbricoides* em biossólidos para uso em adubação

Cenário 1				
Aplicação do biossólido	Pi' (pppd)	d' (Ovos viáveis de Ascaris)	Mbioss (g solo)	C' (Ovos viáveis de Ascaris/ g ST)
	1,60E-06	1,69E-05	0,08	2,11E-04

pppd: por pessoa por dia; ST: sólidos totais

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 12: Concentrações toleráveis de *A. lumbricoides* em biossólidos para manejo de culturas de alface e cenoura.

Cenário 2						
Manejo da cultura (Alface)	Pi' (pppd)	d' (Ovo viável de Ascaris)	Msolo (g)	D	F	C' (Ovos viáveis de Ascaris/ g ST)
	5,71E-07	6,02E-06	0,1	1	0,00315	1,91E-02
Manejo da cultura (Cenoura)	5,71E-07	6,02E-06	0,1	1	0,00255	2,36E-02

pppd: por pessoa por dia; ST: sólidos totais

Fonte: Autora, 2022

Conforme dados apresentados, para o cenário 1 o VMP de ovos viáveis de *áscaris* no biossólido deveria ser de $2,11 \times 10^{-4}$ ovo /g, ou seja, praticamente isento de *A. lumbricoides*, o que implicaria num tratamento do lodo *in natura* (C_0) com 5,78 logs de redução. Mesmo o lodo após 90 dias de secagem ($C_{90} = 0,40$ ovos viáveis/g) deveria passar por tratamento adicional com eficiência de 99,95% ou com redução de 3,28 logs.

Para o cenário 2, a concentração de ovos viáveis de *áscaris* deve ser da ordem de 10^{-2} ovo viável/g de material, pois os riscos são menores que para a adubação. Ainda assim, nenhum dos materiais avaliados está apto para uso imediato, sendo necessário tratamento com redução de 95,22 a 94,1%, no caso do biossólido C_{90} .

5.4 Análise crítico-comparativa

Considerando-se os limites para ovos de helmintos em biossólidos de Classe A, a legislação internacional (Norma 503 da U.S. EPA) é mais limitante do que a legislação brasileira (CONAMA, 2020), que tem o mesmo valor estabelecido pelas diretrizes da OMS, que consta na Tabela 3.

De acordo com os resultados encontrados na caracterização das concentrações toleráveis de *A. lumbricoides* em bioossólidos (Tabela 11 e Tabela 12), pode-se observar que os valores toleráveis obtidos para o uso do bioossólido em adubação foi de $2,11 \times 10^{-4}$ ovos viáveis de helmintos por grama de sólidos totais de bioossólidos, em manejo da cultura da alface foi de $1,91 \times 10^{-2}$ ovos viáveis de helmintos por grama de sólidos totais de bioossólidos, e em manejo da cultura da cenoura foi de $2,36 \times 10^{-2}$ ovos viáveis de helmintos por grama de sólidos totais de bioossólidos, todos os três valores estando abaixo dos valores indicados como parâmetros para a utilização de bioossólidos, tanto para o de Classe A na Resolução CONAMA 498/2020 e para a Norma 503 da U.S. EPA, quanto para as diretrizes da OMS (Tabela 3).

Isso implica que a concentração de ovo viável de helmintos por grama de sólidos totais de bioossólidos deve ser da ordem de 10^{-4} ovo viáveis/g de material para a atividade de aplicação/adubação do bioossólido e da ordem 10^{-2} ovo /g para a atividade de manejo das culturas de cenoura e alface, de forma que os riscos possam ser aceitáveis/toleráveis por legislações (nacionais e internacionais) e diretrizes da OMS.

Fica evidente que, para um único evento de exposição, a atividade de aplicação de bioossólidos, ou seja, a preparação do solo para o plantio implica em maiores riscos aos trabalhadores rurais, lembrando que não está sendo considerado o uso de EPIs.

Esses resultados indicam uma limitação do uso agrícola desse material, e necessidade de aprimoramento nos processos de tratamento.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que, em relação à sanidade, os lodos gerados na ETE do Feira de Santana-BA trazem problemas à saúde de trabalhadores rurais que utilizam esse bioestabilizado. Entretanto, os maiores obstáculos a serem vencidos para a implementação da disposição agrícola do lodo são, na verdade, de solução tecnicamente simples e de baixo custo, pois essa solução envolve o emprego de processos para higienização do lodo, de maneira a atender aos padrões para lodo Classe A na legislação pertinente.

As concentrações de patógenos no bioestabilizado foram obtidas a partir da caracterização microbiológica de lodos. Como o microrganismo *Ascaris lumbricoides* representa cerca de 90% dos helmintos em alimentos cultivados com bioestabilizados, as concentrações identificadas foram 127,09 ovos viáveis de *Ascaris*/g de ST no tempo inicial (C_0) e 0,44 ovos viáveis de *Ascaris*/g de ST no tempo final (C_{90}), após 90 dias de secagem em leito.

De acordo com as simulações aqui formuladas e os resultados apresentados, as características microbiológicas do lodo *in natura* (C_0) inviabilizam seu uso, em todos os cenários avaliados, pois, ficam evidentes os riscos de infecção anual por *Ascaris* para aplicação e manejo, com valores que ultrapassam os toleráveis pela OMS ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa).

A partir dos resultados referentes a utilização do bioestabilizado Classe A (C_{90}), pode-se afirmar que tal prática levaria, segundo os modelos de exposição elaborados, a valores de riscos anuais não aceitáveis, se comparados aos valores tidos como toleráveis pela OMS, porém eles apresentaram melhores resultados comparados com os do lodo *in natura* (C_0).

A determinação das concentrações de helmintos ditas toleráveis, segundo valores da OMS, nos bioestabilizados para o uso em adubação foi de $2,11 \times 10^{-4}$ ovos viáveis de *Ascaris*/g de ST, em manejo da cultura da alface foi de $1,91 \times 10^{-2}$ ovos viáveis de *Ascaris*/g de ST, e em manejo da cultura da cenoura foi de $2,36 \times 10^{-2}$ ovos viáveis de *Ascaris*/g de ST. Em nenhum dos três cenários antedeu ao dos valores indicados como parâmetros para a utilização de bioestabilizados, tanto para o de Classe A na Resolução CONAMA 498/2020 e para a Norma 503 da U.S. EPA, quanto para as diretrizes da OMS.

Com os resultados obtidos, pode-se observar que a atividade de aplicação do biossólido resulta em maiores riscos aos trabalhadores rurais, por ser uma prática realizada de forma manual. Visto que o lodo proveniente de um reator UASB, que passou apenas por um leito de secagem necessita de uma higienização antes do uso agrícola. E que o uso de EPIs pode garantir uma proteção aos trabalhadores rurais e deve ser incentivado.

A AQRM demonstrou ser de grande importância para a avaliação do uso do biossólido, proveniente de lodo de ETE, na agricultura.

REFERÊNCIAS

ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. v.2 n.1, 2021.

AGUSTINI, D.; ONOFRE, S. B. Caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto produzido pela estação de tratamento de esgoto (ETE) de Pato Branco – PR. Revista de Biologia e Saúde da UNISESP: Biology & Health Journal. v.1, n.1, 2. 2007.

ANDREOLI, C. V. (coord.). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Cleverson Vitório Andreoli (coordenador). Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 257 p. 2001.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. Capítulo 8. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: SANEPAR, 2001.

ANDREOLI, C. V. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema. Curitiba: Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 1999.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica, v. 2, n. 1, p. 143-159, 2009.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MARA, D. D. 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.

BLUMENTHAL, U. J. et al. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. Bulletin of the World Health Organization, v. 78, n. 9, p. 1001-1116, 2000.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 20 de ago. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 380, de 31 de outubro de 2006. Retifica a Resolução CONAMA 375/2006. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 07 de nov. 2006.

CARRIJO, J. R.; BIONDI, G. F. Levantamento de ovos de helmintos em lodo de esgoto oriundo de Campo Grande (MS) após tratamento anaeróbico. *Ciência animal brasileira*, v. 9, n. 1, p. 207-211, 2008.

CARRINGTON, E. G. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction: final report. Study contract nº B4-3040/2001/322179/MAR/A2. European Commission. Set/2001. p.42.

CHAGAS, W. F. Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro. (Dissertação). Rio de Janeiro: Fundação Osvaldo Cruz, 2000, p. 89.

COSTA, A. de F. S. da.; COSTA, A. N. da.; CAETANO, L. C. S.; MAIA, F. G. Disposição do lodo de ETE no solo e seu efeito na produção agrícola. Vitória, ES: Incaper, 2012.

DIAS, E. H. O. Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de biossólidos para uso agrícola. 162 f., 2012. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2012.

DUARTE, A. C. L. Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final do resíduo. Dissertação (Mestre em Engenharia Sanitária) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

EISENBERG, J. N. S. et al. Microbial Risk Assessment Framework for Exposure to Amended Sludge Projects. *Environmental Health Perspectives*, v. 116, n. 6, p. 727-733, 2008.

GALE, P. Using event trees to quantify pathogen levels on root crops from land application of treated sewage sludge. *Journal of Applied Microbiology*, v. 94, p. 35- 47, 2003.

GAMA, A. Economia Circular e Sustentabilidade (ECeS): Um ponto de vista. Portal do Saneamento Básico. São Paulo/SP, 2019.

GERARDI, M. H.; ZIMMERMAN, M. C. Wastewater pathogens. John Wiley & Sons, p. 179. 2004.

HAAS, C. N.; ROSE, J. B.; GERBA, C. P. Quantitative microbial risk assessment. New York: John Wiley & Soares, 427p. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa de orçamentos familiares 2017- 2018: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil. 120 p. IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento - Rio de Janeiro. 2020.

IGNOTO, R. F. Avaliação quantitativa do risco microbiológico em águas e biossólidos: estado da arte. 89 f., 2010. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2010.

IWAKI, G. Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. Portal Tratamento de Água. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-et-es/> Acesso em: 30 de maio de 2017

JIMENEZ, B.; AUSTIN, A.; CLOETE, E.; PHASHA, C. Using Ecosan sludge for crop production. *Water Science & Technology*, v.54, n.5, 169–177p. IWA Publishing. 2006.

KRZYZANOWSKI JR, F.; LAURETTO, M. S.; NARDOCCI, A. C.; SATO, M. I. Z.; RAZZOLINI, M. T. P. Assessing the probability of infection by *Salmonella* due to sewage sludge use in agriculture under several exposure scenarios for crops and soil ingestion. *Science of the Total Environmen*, v.568, p. 66–74.

- LOPES, W. S. Caracterização, solubilização e tratamento de lodos de esgotos com recuperação de subprodutos. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. Centro de Tecnologia. 2019.
- MACHADO, M. F. S. A situação brasileira dos bio-sólidos. 2001. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2001.
- MAGALHÃES, T. B. Uso agrícola de bio-sólidos: análise crítica da Resolução CONAMA 375/2006 na perspectiva da metodologia de avaliação quantitativa de risco microbiológico. 202 f., 2012. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2012.
- MELO, J. H. S. Avaliação de riscos de infecção associados a helmintos em função do consumo de hortaliças cultivadas em solo com aplicação de bio-sólidos. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Alagoas. 2021.
- MARA, D. D.; SLEIGH, A. Estimation of Ascaris infection risks in children under 15 from the consumption of wastewater-irrigated carrots. *Journal of Water and Health*, v. 8, n. 1, p. 35-39, 2010.
- NAVARRO, I. B. J.; CIFUENTES, E.; LUCARIO, S. Application of Helminth ova infection dose curve to estimate the risks associated with biosolid application on soil. *Journal of Water and Health*, 31-44p. IWA Publishing, 2009.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Nota Informativa nº 4, de 18 de junho de 2021.
- SABESP. Economia Circular Aplicada em Estações de Tratamento de Esgoto- Disciplina PRG 008. Superintendência de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação. São Paulo, 2019.
- SANTOS, D. S.; TESHIMA, E.; DIAS, S. M. F.; ARAÚJO, R.; SILVA, C. M. R. Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 2, p. 341-349, 2017.

THOMAZ-SOCCOL, V.; PAULINO, R. C. Riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos pelo uso do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 245-258.

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

WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (Vol. 4). Wastewater use in agriculture. World Health Organization, Geneva. 2006a.

WHO. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. (Vol. 1). Policy and regulatory aspects. World Health Organization, Geneva. 2006b.

WHO. Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management. World Health Organization, Geneva, 2016. 204p.