

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 02/03/2025.



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA: BIODEGRADABILIDADE E
IMPLICAÇÕES ECOTOXICOLÓGICAS**

JOSSANDRA ENDYARA DOS SANTOS

**Rio Claro – SP
2023**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGIA CELULAR, MOLECULAR E MICROBIOLOGIA)**

**APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA: BIODEGRADABILIDADE E
IMPLICAÇÕES ECOTOXICOLÓGICAS**

JOSSANDRA ENDYARA DOS SANTOS

Orientadora: Profa. Dra. Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales

Coorientadora: Profa. Dra. Dejanira de Angellis

Dissertação apresentada ao
Instituto de Biociências do Câmpus
de Rio Claro, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre
em Biologia Celular, Molecular e
Microbiologia.

**Rio Claro – SP
2023**

S237a Santos, Jossandra Endyara dos
Aproveitamento do lodo de ETA: biodegradabilidade e implicações ecotoxicológicas / Jossandra Endyara dos Santos. -- Rio Claro, 2023
100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientadora: Profa. Dra. Dânia Elisa Christofolletti Mazzeo Morales
Coorientadora: Profa. Dra. Dejanira de Angellis

1. Resíduos sólidos orgânicos. 2. Resíduos sólidos orgânicos. 3. Biodegradação. 4. Bioestimulação. 5. Fitotoxicidade. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo contribui para o gerenciamento adequado de resíduos orgânicos provenientes das agroindústrias e também do lodo gerado no processo de tratamento de água, o qual, geralmente, é descartado em rios, causando poluição e prejudicando a vida aquática. Além disso, este trabalho buscou criar um processo efetivo de aproveitamento, detoxificação e biotransformação do lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água), que possa ser utilizado em larga escala para produção de um fertilizante orgânico de baixo risco ambiental e com elevada ação fertilizante. Sendo o Brasil um país prioritariamente agrícola e altamente dependente da importação de fertilizantes, a produção nacional desse insumo acarretaria na diminuição de custos da produção, favorecendo diretamente o produtor agrícola e o mercado consumidor. Adicionalmente, espera-se contribuir para avanços significativos na área de recuperação ambiental, agricultura sustentável, água potável e saneamento, produção responsável e proteção da vida terrestre, colaborando com os objetivos de desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 propostos pela ONU.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study contributes to the proper management of organic waste from agroindustries and also the sludge generated in the water treatment process, which is usually discarded in rivers, causing pollution and harming aquatic life. In addition, this work aimed to create an effective process for the use, detoxification, and biotransformation of ETA sludge, which can be used on a large scale for the production of organic fertilizer with low environmental risk and high fertilizing action. As Brazil is primarily an agricultural country and highly dependent on fertilizer imports, domestic production of this input would lead to a reduction in production costs, directly favoring agricultural producers and the consumer market. Additionally, it is expected to contribute to significant advances in the area of environmental recovery, sustainable agriculture, drinking water and sanitation, responsible production and protection of life on earth, collaborating with the sustainable development objectives of the 2030 Agenda proposed by the UN.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: APROVEITAMENTO DO LODO DE ETA: BIODEGRADABILIDADE E IMPLICAÇÕES ECOTOXICOLÓGICAS

AUTORA: JOSSANDRA ENDYARA DOS SANTOS

ORIENTADORA: DÂNIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORALES

COORIENTADORA: DEJANIRA DE FRANCESCHI DE ANGELIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências Biológicas, área: Diversidade Biológica e Biologia Ambiental pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. DÂNIA ELISA CHRISTOFOLETTI MAZZEO MORALES (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia e Produção Vegetal e Animal / UFSCar



Profa. Dra. ELIS MARINA TURINI CLARO (Participação Virtual)
Departamento de Microbiologia / UNOESTE



Prof. Dr. MATHEUS MANTUANELLI ROBERTO (Participação Virtual)
UNIARARAS / Centro Universitário Hermínio Ometto

Rio Claro, 02 de março de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus.

À professora Dânia, orientadora, e à professora Dejanira, co-orientadora, por acreditarem em mim, mesmo com todos os desafios enfrentados, pela confiança, disposição, paciência e todos os ensinamentos. Obrigada por me ajudarem a realizar esse sonho.

Agradeço à Dilza, que várias vezes se dispôs a me ajudar tanto na parte prática, como na escrita. Ao Zito, Ralyvan, Matheus, Thomaz, por todo auxílio e cooperação no meu trabalho.

À minha família, que muitas vezes veio até Rio Claro para cuidar do meu filho enquanto eu estava no laboratório, sempre me apoiando e incentivando. E em especial meu filho, Kaynan, a quem não meço esforços para propiciar uma educação com qualidade.

Agradeço aos gestores, diretores e operadores do Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE) de Rio Claro, por doarem a amostra de lodo para o projeto.

À UNESP, pela infraestrutura para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Obrigada!

RESUMO

Devido às atividades antrópicas, a qualidade das águas dos mananciais está cada vez mais comprometida. Então, antes da água ser distribuída aos seus consumidores, ela precisa passar por um processo de tratamento que visa eliminar as impurezas que podem oferecer risco à saúde pública. Durante esse tratamento, é gerado um resíduo (lodo de ETA), resultado das etapas de coagulação e filtração. Geralmente, este resíduo é constituído de microrganismos, algas, materiais suspensos, matéria orgânica, compostos orgânicos, minerais e, também, alta concentração de ferro ou alumínio, por causa do coagulante utilizado na etapa de coagulação. Como o lodo é produzido em larga escala, pois está relacionado com a demanda de água potável, há uma preocupação em encontrar um descarte adequado, ou seja, que não ofereça risco de contaminação ambiental, à saúde humana e que seja economicamente viável. Dentro das diversas possibilidades para seu aproveitamento, a disposição em solos agrícolas é bastante promissora e sustentável. Entretanto, esse resíduo pode conter contaminantes orgânicos, metais pesados e microrganismos de caráter patogênico, o que tornaria sua disposição em solo inviável. A deposição inapropriada desse resíduo oferece alto risco ambiental, então, este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia de baixo custo, empregando outros resíduos, de origem agroindustrial (bagaço de cana-de-açúcar e fibra de coco), como agentes descompactantes e estimulantes para biodegradar os possíveis compostos tóxicos existentes no lodo e biotransformá-lo em um insumo agrícola. Adicionalmente, também foram avaliados os efeitos ecotoxicológicos sobre organismos de diferentes níveis tróficos. Foi realizada a caracterização físico-química e a patogenicidade do lodo, avaliando a presença de coliformes totais, *Escherichia coli* e ovos de *Ascaris* spp.. As amostras foram misturadas em solo, utilizando duas concentrações de lodo (10% e 15%), com e sem incorporação de bagaço de cana-de-açúcar e fibra de coco. O ensaio de respirometria foi aplicado para verificar a biodegradabilidade do lodo de ETA, quantificando a produção de CO₂ das diferentes amostras, durante 120 dias. As amostras, antes e após a biodegradação, foram avaliadas quanto ao seu potencial fitotóxico (sementes de *Lactuca sativa* e *Eruca sativa*), toxicidade aguda (*Daphnia similis* e *Folsomia candida*) e teste de reprodução (*F. candida*). Quanto ao resultado da patogenicidade, o lodo de ETA, antes do processo de biodegradação, apresentou ausência de *E. coli* e ovo de *Ascaris* spp., e número muito baixo de colônias de coliformes totais. Dentre as características físico-químicas, o lodo apresentou pH próximo da neutralidade e baixa concentração de metais, porém continha excesso de líquidos livres, o que tornou indispensável o processo de secagem. A

utilização dos resíduos agroindustriais, otimizou a produção de CO₂, no entanto não contribuiu para a biodegradação do lodo de ETA. No teste de fitotoxicidade, as amostras que continham lodo associado com o bagaço de cana-de-açúcar apresentaram toxicidade moderada a alta, havendo inibição de germinação e diminuição do crescimento da radícula e do hipocótilo. Resultados semelhantes foram observados para *D. similis*, indicando que o bagaço liberou compostos tóxicos hidrossolúveis. No entanto, após a biodegradação, nenhum efeito tóxico foi observado demonstrando que o processo de biotransformação empregado levou à detoxificação das amostras. No teste com *F. candida*, não houve letalidade significativa, porém as amostras que continham lodo na concentração de 10% interferiram negativamente na reprodução desses organismos. Assim, o lodo estudado apresenta características físico-químicas interessantes para utilização como condicionantes e fertilizantes de solos agrícolas, entretanto, pela toxicidade observada, é indispensável a realização de um processo de biodegradação/bioestimulação para promover a eliminação desse efeito e, desse modo, garantir a segurança ambiental, proporcionando um destino sustentável.

Palavras-chaves: Resíduos sólidos orgânicos; biodegradação; bioestimulação; fitotoxicidade; toxicidade aguda; teste de reprodução.

ABSTRACT

Due to anthropic activities, the quality of water is increasingly compromised. So, before the water is distributed to its consumers, the raw water needs to undergo a treatment process that aims to eliminate impurities that may pose a risk to public health. During this treatment, a residue (WTP sludge) is generated, resulting from the coagulation and filtration steps. Generally, this residue consists of microorganisms, algae, suspended materials, organic matter, organic compounds, minerals, and also a high concentration of iron or aluminum, due to the coagulant used in the coagulation stage. As sludge is produced on a large scale, as it is related to the demand for drinking water, there is a concern to find an adequate disposal, to avoid posing a risk of environmental contamination and damage to human health, besides being economically viable. Within the various possibilities for its use, disposal in agricultural soils is very promising and sustainable. However, this residue may contain organic contaminants, heavy metals, and pathogenic microorganisms that would make its disposal in soil unfeasible. The inappropriate disposal of this residue poses a high environmental risk, so this work aimed to propose a low-cost methodology, using other residues, of agro-industrial origin (sugar cane bagasse and coconut fiber), as decompacting and stimulants agents to biodegrade the possible toxic compounds existing in the sludge and biotransform it into an agricultural input. Additionally, the ecotoxicological effects on organisms of different trophic levels were also evaluated. The physical-chemical characterization and the pathogenicity of the sludge were carried out, assessing the presence of total coliforms, *Escherichia coli*, and *Ascaris* ssp. eggs. The samples were mixed in the soil, using two concentrations of sludge (10% and 15%), with and without the incorporation of sugarcane bagasse and coconut fiber. The respirometer test was applied to verify the biodegradability of the WTP sludge, quantifying the CO₂ production of the different samples, for 120 days. The samples, before and after biodegradation, were evaluated for their phytotoxic potential (*Lactuca sativa* and *Eruca sativa* seeds), acute toxicity (*Daphnia similis* and *Folsomia candida*), and reproduction test (*F. candida*). As for the result of pathogenicity, the WTP sludge showed the absence of *Ascaris* ssp. and *E. coli*, and very low numbers of total coliform colonies. Among the physical-chemical characteristics, the sludge showed a pH close to neutrality and a low concentration of metals, but it contained excess free liquids, which made the drying process indispensable. The use of agro-industrial residues optimized the production of CO₂, however, it did not contribute to the biodegradation of the WTP sludge. In the phytotoxicity test, the samples that contained sludge associated with

sugarcane bagasse showed moderate to high toxicity, with germination inhibition and reduction of radicle and hypocotyl growth. Similar results were observed for *D. similis*, indicating that the bagasse released water-soluble toxic compounds. However, after biodegradation, no toxic effect was observed, demonstrating that the biotransformation process employed led to detoxification of the samples. In the test with *F. candida*, there was no significant lethality, but the samples that contained sludge at a concentration of 10% negatively interfered with the reproduction of these organisms. Thus, the sludge studied presented interesting physicochemical characteristics for use as conditioners and fertilizers for agricultural soils. However, due to the observed toxicity, it is essential to carry out a biodegradation/biostimulation process to promote the elimination of this effect and, thus, guarantee environmental security, providing a more sustainable destination.

Keywords: Organic solid waste; biodegradation; biostimulation; phytotoxicity; acute toxicity; reproduction test.

LISTA DE FIGURAS

Artigo 1

Figura 1	Montagem do ensaio para determinação de líquidos livres	30
Figura 2	Etapas da secagem do lodo de ETA. A: Lodo após 24 horas; B: Lodo após 4 dias; C: Lodo após 7 dias de secagem	35
Figura 3	Esquema de um respirômetro de Bartha e Pramer. A: Tampa da cânula; B: Cânula (diâmetro de 1 a 2 mm); C: Rolha de borracha; D: Braço lateral (diâmetro de 40 mm; altura de 100 mm); E: Solução de KOH; F: Amostra; G: Frasco Erlenmeyer (250 mL); H: Válvula; I: Suporte (lã de vidro); J: Filtro de cal sodada (diâmetro de 15 mm; altura de 40 mm)	36
Figura 4	Reta analítica de CO ₂ em função da condutividade medida em solução de KOH	48
Figura 5	Produção de CO ₂ diária observada no ensaio de respirometria	49
Figura 6	Produção acumulada de CO ₂ observada durante os 120 dias de experimento	51
Figura 7	Eficiência de biodegradabilidade das amostras, na ausência do solo, calculada a partir dos dados respirométricos após 120 dias de ensaio	54
Figura 8	Comprimento do hipocótilo de <i>L. sativa</i> após exposição a diferentes amostras, antes e após processo de biodegradação	57
Figura 9	Placas de Petri contendo sementes de alface germinadas. A. Sementes germinadas expostas à amostra S + ETA 10% + B 5% antes do ensaio de respirometria, classificada como altamente tóxica; B. Sementes germinadas referentes ao controle negativo	58

Artigo 2

Figura 1	Comprimento do hipocótilo de <i>E. sativa</i> expostas a diferentes amostras, antes e após processo de bioestimulação	78
Figura 2	Média de organismos vivos (<i>Daphnia similis</i>) expostos às diferentes amostras, antes e após o processo de bioestimulação	79
Figura 3	Quantidade total de colêmbolos, adultos e filhotes, expostos nas diferentes amostras, antes do processo de biodegradação	82

LISTA DE TABELAS

Artigo 1

Tabela 1	Caracterização química do Lodo de ETA, quanto à presença de compostos inorgânicos	29
Tabela 2	Volumes de reagentes empregados nas soluções utilizadas para a construção da reta analítica e correlação com o íon carbonato	35
Tabela 3	Série de sólidos e porcentagem de carbono total, carbono orgânico e teor de umidade dos materiais empregados	43
Tabela 4	Contagem de bactérias heterotróficas nas diferentes amostras (UFCpor grama de amostra seca)	52
Tabela 6	Avaliação do efeito fitotóxico das amostras sobre a germinação e o comprimento da radícula de <i>Lactuca sativa</i>	56

Artigo 2

Tabela 1	Composição de cada amostra avaliada, com base na massa seca decada material	73
Tabela 2	Fitotoxicidade das amostras quanto aos parâmetros relativos à germinação e comprimento da radícula de <i>Eruca sativa</i> , antes e após bioestimulação das amostras	77
Tabela 3	Resultado do teste de letalidade com <i>F. candida</i> como bioindicador, antes do processo de biodegradação	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B	Boro
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Ca	Cálcio
Cl	Cloro
Cm	Centímetros
CN	Controle negativo
CO	Carbono Orgânico
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Controle positivo
CR	Crescimento relativo
CT	Carbono Total
Cu	Cobre
ds/m	Decisiemens por metro
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe	Ferro
g	Gramas
GR	Germinação relativa
IG	Índice de germinação
K	Potássio
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
KHC ₈ H ₄ O ₄	Biftalato de potássio
KOH	Hidróxido de Potássio
m ³	Metro cubico
M	Molar
Mg	Magnésio
mL	Mililitro

Mn	Manganês
MO	Matéria Orgânica
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
ND	Não Determinado
NMP	Número Mais Provável
P	Fósforo
S	Enxofre
S	Solo
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TU	Teor de Umidade
UFC	Unidades Formadoras de Colônias
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
	2.1 Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO DA LITERATURA	15
	3.1 Tratamento da água, legislação e produção de lodo	15
	3.2 Características e composição do lodo de ETA	17
	3.3 Problemas ambientais relacionados com o descarte inadequado do lodo de ETA	18
	3.4 Efeitos benéficos da utilização do lodo de ETA para recuperação de solos	19
	3.5 Estratégias para a detoxificação de lodo de ETA	19
	3.6 Bioensaios de toxicidade para avaliação de lodo de ETA	20
	3.7. Avaliação patogênica do lodo de ETA	22
4	RESULTADOS	23
	Artigo 1: Bioestimulação de lodo de tratamento de água visando ao uso sustentável: avaliação respirométrica e fitotoxicidade	
	Artigo 2: Avaliação ecotoxicológica de lodo de tratamento de água, antes e após bioestimulação com resíduos da agroindústria	
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6	REFERÊNCIAS	88
7	APÊNDICE	93

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população mundial, aumenta também a necessidade de fornecer água potável, sendo assim, as estações de tratamento de água (ETA) ficam responsáveis pelo tratamento da água bruta antes de ser distribuída aos seus consumidores (GOMES *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2022; PHAM *et al.*, 2021). Entretanto, esse processo gera um resíduo denominado lodo, que contém as impurezas da água bruta captada, bem como produtos químicos utilizados no processo de tratamento, como o ferro ou alumínio do coagulante que é empregado no processo de floculação (BATISTA *et al.*, 2021; NGUYEN *et al.*, 2022; QRENAWI; RABAH, 2021).

Geralmente, o lodo gerado nas ETA é descartado *in natura* em aterros sanitários ou em mananciais próximos (SANTOS *et al.*, 2021), causando contaminação do ambiente, além de oferecer riscos à saúde humana, pois este pode conter compostos tóxicos e microrganismos de caráter patogênico (BARAKWAN; TRIHADININGRUM; BAGASTYO, 2019; SILVA; BORTTREL; PEREIRA, 2018). Assim, o maior desafio das ETA e dos gestores ambientais quanto ao lodo produzido é encontrar uma destinação que não cause danos ao ambiente e que seja economicamente viável (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016a).

Atualmente, existem vários estudos sobre o reaproveitamento desse resíduo, desde sua utilização em produtos de construção civil, como tijolos e cimentos, devido à sua composição mineral, até a aplicação em solo (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016b; GOMES *et al.*, 2019). Neste sentido, o lodo de ETA contém compostos orgânicos, inorgânicos e microrganismos, tornando vantajosa sua utilização como condicionantes ou fertilizante de solos (ODIMEGWU *et al.*, 2018). São descritos em diversos estudos os benefícios da utilização do lodo de ETA como condicionante e fertilizante de solos, já que ele auxilia na estrutura, capacidade de retenção de água, troca iônica e fertilidade do solo (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016a; RIBEIRO *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2022).

Segundo Barakwan, Trihadiningrum e Bagastyo (2019), o lodo é constituído por uma alta concentração de sílica, alumínio, ferro, cálcio e baixa concentração de orgânicos e outros nutrientes, o que o torna interessante para aplicação em solos agrícolas. Contudo, o acréscimo de resíduos agroindustriais possibilitaria o aumento da quantidade de matéria orgânica e uma maior porosidade ao lodo, por atuarem como agentes de volume, proporcionando, deste modo, a obtenção de um aditivo mais nutritivo, além de auxiliar na diversidade e manutenção da comunidade microbiana (FERNANDO-FONCILLAS *et al.*, 2021; FRANCO *et al.*, 2021).

Antes do resíduo ser disposto em solo, faz-se necessária a detoxificação, visando eliminar os compostos tóxicos existentes, garantindo a segurança do ambiente. A biorremediação é uma tecnologia biológica de descontaminação de matrizes ambientais, na qual os microrganismos vão mineralizar ou degradar contaminantes orgânicos (MALLMANN *et al.*, 2019; SHARMA *et al.*, 2021; SOMMAGGIO *et al.*, 2018a). Neste sentido, a biorremediação apresenta uma série de vantagens, tanto econômica, quanto ambiental, já que não são utilizados produtos sintéticos, não há aumento na geração de resíduos, entre outras (KOUR *et al.*, 2021; MAZZEO *et al.*, 2020). Pensando na otimização do processo, podem ser utilizados aditivos, ou seja, materiais que estimulam o crescimento microbiano, efetivando a degradação dos compostos tóxicos orgânicos, além de diminuir o período de biorremediação. Os agentes estimulantes são responsáveis por aumentar a aeração e/ou contribuir com nutrientes adicionais ao sistema (KOUR *et al.*, 2021; SOMMAGGIO *et al.*, 2018b; TYAGI; FONSECA; CARVALHO, 2011).

A princípio, um composto pode não apresentar toxicidade, mas com o decorrer do tempo, pode sofrer alterações químicas e/ou físicas no ambiente e se tornar tóxico, afetando assim o ecossistema (CORREIA, 2019). Para avaliar o efeito tóxico, a biodisponibilidade para os organismos e comprovar a detoxificação do processo de biorremediação, são utilizadas espécies sensíveis ao estresse químico, a xenobióticos e outros contaminantes orgânicos. Com os bioensaios, é possível observar como o contaminante age sobre os organismos, por exemplo, se causa letalidade, alterações genéticas, comportamentais ou fisiológicas (FELIPE, 2019; MAZZEO *et al.*, 2016a; MAZZEO *et al.*, 2016b; SOMMAGGIO *et al.*, 2018b). Desse modo, os bioensaios são cruciais para a avaliação do potencial tóxico do lodo de ETA, bem como para verificar a efetividade do processo de biorremediação desse resíduo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O lodo de ETA estudado apresentou características físico-químicas interessantes que são importantes para as plantas e manutenção do solo, além de baixa patogenicidade. Em relação a esses parâmetros, a disposição do lodo em solo não oferece nenhum risco ambiental. Entretanto, o lodo contém grande quantidade de água, sendo essencial realizar um processo de secagem para evitar que ocorra a percolação de líquidos com possíveis contaminantes para águas superficiais e/ou subterrâneas e camadas profundas do solo.

Com base nos resultados obtidos de fitotoxicidade, toxicidade aguda e no teste de reprodução, o lodo puro ou associado com solo e/ou a fibra de coco, não teve efeitos tóxicos sobre os organismos alvos. Com tudo, no teste de reprodução, a amostra que continha lodo na concentração 10% (na presença ou ausência do bagaço de cana), inibiu significativamente a geração de descendentes, indicando que o lodo, nessa concentração, causa estresse sobre *F. candida*. Isso impõe a necessidade de tratamentos de detoxificação antes de sua utilização agrícola.

As amostras que continham o bagaço de cana-de-açúcar associado com o lodo de ETA apresentaram toxicidade moderada a alta em todos os bioensaios, indicando que essa mistura também requer um tratamento de detoxificação antes de ser disposta em solo. Contudo, após o período de 120 dias de biodegradação mostrou ser o suficiente para eliminar esses efeitos tóxicos apresentados nos ensaios de fitotoxicidade e toxicidade aguda, tornando segura a disposição em solos agrícolas.

Após o processo de biodegradação, o lodo tem sua ação de fertilizante otimizada, proporcionando um maior crescimento dos órgãos vegetais. A associação dos agentes bioestimulantes não favorece o processo de biodegradação, mas podem contribuir com nutrientes adicionais, complementando os já presentes no lodo de ETA ou melhorar a característica física do composto.

6 REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10.004 - Classificação de Resíduos Sólidos. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, e. 2, 2004.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, v. 35, p. 950–955, 2016a.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable Management of Water Treatment Sludge Through 3 'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1–13, 2016b.
- BARAKWAN, R. A.; TRIHADININGRUM, Y.; BAGASTYO, A. Y. (2019). Characterization of alum sludge from Surabaya Water Treatment Plant, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, v. 20, n. 5, p. 7–13, 2019.
- BATISTA, I. F. *et al.* Potential Contribution water treatment plant (WTP) sludge to river pollution. *Scientia Plena*, v. 17, n. 10, 2021.
- BLAISE, C.; FÉRAD, J-F. Overview of contemporary toxicity testing. *Small-Scale Freshwater Toxicity Investigations*, v. 1, p 1-68, 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS No 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS no 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 07 mai. 2021, s. 1, e.58, p. 127, 2021.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Conselho Nacional do Meio Ambiente*, 2005.
- BRASIL. *Secretária Nacional de Vigilância Sanitária*. Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano. Brasília, DF, 2006.
- BRASIL. Lei 12.305. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, Brasília, DF, 2010. Disponível em: planalto.gov.br.
- BRENDA, M. *et al.* Efeitos ecotoxicológicos de metais aos organismos aquáticos. *Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 14, n. 4, 2018.
- CHINVELSKI, F. T. W. *Avaliação do Processo de Coagulação/Floculação para Tratamento de Água Potável de Manancial Superficial*. universidade Federal da Fronteira do Sul, Cerro Largo, Trabalho de Conclusão de Curso, 2018.
- CORREIA, J. E. Histórico Da Aplicação De Vinhaça Em Canaviais: Bioensaios De Toxicidade Terrestre E Aquática Jorge Evangelista Correia. *Universidade Estadual Paulista*, Rio Claro, São Paulo, Tese de Doutorado, 2019.
- COSTA, T. *et al.* Bioindicators Assessing Water Quality and Environmental Impacts of Water Treatment Plant Sludge. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, v. 16, n. 1, p. 25-42, 2017.

- CRUZ, D. C. M. V. Ecotoxicidade de cascalhos de perfuração de poços de petróleo: aspectos ecológicos para a disposição em solo. *Universidade Federal de Santa Catarina*, Curitiba, SC, Dissertação de Mestrado, 2022.
- DASSANAYAKE, K. B. *et al.* A Review on Alum Sludge Reuse with Special Reference to Agricultural Applications and Future Challenges. *Waste Management*, v. 38, n. 1, p. 321–335, 2015.
- DUBE, S. *et al.* Effects of sludge water from a water treatment works on soil properties and the yield and elemental uptake of *Brachiaria decumbens* and lucerne (*Medicago sativa*). *Agricultural Water Management*, v. 208, p. 335-343, 2018.
- DUTTA, J. M. A. A. Acute and Chronic Toxicity of Fluoroquinolone Antibiotics through Fresh Water cladocera *Daphnia magna*. *ResearchGate*, p. 874-879, 2019.
- EBERT, D. *Daphnia* as a versatile model system in ecology and Evolution. *EvoDevo*, v. 13, n. 1, 2022.
- EXLEY, C.; MOLD, M. Aluminium in human brain tissue: how much is too much?. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, v. 24, n. 8, p. 1279-1282, 2019.
- FELIPE, M. C. Bioensaios de toxicidade utilizando invertebrados aquáticos em exposição Alquilbenzeno Linear Sulfonado. *Universidade de São Paulo*, São Carlos, São Paulo, Tese de doutorado, 2019.
- FERNANDO-FONCILLAS, C. *et al.* Co-management of sewage sludge and other organic wastes: A scandinavian case study. *Energies*, v. 14, 2021.
- FRANCO, N. M. *et al.* Biodegradability of water treatment sludge influenced by sewage sludge, focusing its use in agriculture as soil conditioner. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2021.
- GASPARD, P. G.; SCHWARTZBROD, J. Parasite contamination (helminth eggs) in sludge treatment plants: Definition of a sampling strategy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 206, n. 2, p. 117–122, 2003.
- GOMES, S. C. *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 145, p. 148–159, 2019.
- GUEVARA, M. D. F. Fitotoxicidade em águas residuárias domésticas utilizando sementes como bioindicadores. *Revista DAE*, v. 67, n. 216, p. 44-51, 2019.
- GUZMAN, M. A. L. G. *et al.* Efficiency of Combined Co-composting, Vermicomposting, and Drying in the Treatment of Cadmium, Mercury, Helminths, and Coliforms in Sludge from Wastewater Facilities for Potential Agricultural Applications. In *Science* (Vol. 149, Issue 1).
- KAMIWADA, W. Y.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Use of polyaluminium chloride in studies of water supply treatability through coagulation, flocculation, and sedimentation. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 5, p. 667–676, 2020.
- KOUR, D. *et al.* Beneficial microbiomes for bioremediation of diverse contaminated environments for environmental sustainability: present status and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 24917-2439, 2021.

- KYNCL, M. OPPORTUNITIES FOR WATER TREATMENT SLUDGE RE. *GeoScience Engineering*, v. 1, p. 11–22, 2008.
- MALLMANN, V. *et al.* As Vantagens da Biorremediação na Qualidade Ambiental. *Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e Da Saúde*, v. 23, n. 1, p. 12-15, 2019.
- MAZZEO, D. E. C. *et al.* Monitoring the Natural Attenuation of a Sewage Sludge Toxicity Using the Allium Cepa Test. *Ecological Indicators*, v. 56, p. 60 - 69, 2015.
- MAZZEO, D. E. C. *et al.* Attesting the Efficiency Of Monitored Natural Attenuation in the Detoxification of Sewage Sludge By Means of Mutagenic Bioassays. In *Chemosphere*, v. 163, p. 508–515, 2016a.
- MAZZEO, D. E. C. *et al.* Detoxification of sewage sludge by natural attenuation and implications for its use as a fertilizer on agricultural soils. *Science of the total Environment*, v. 163, p. 508–515, 2016b.
- MAZZEO, D. E. C. *et al.* Effects of biostimulation by sugarcane bagasse and coffee grounds on sewage sludges, focusing agricultural use: Microbial characterization, respirometric assessment and toxicity reduction. *Waste Management*, v. 118, p. 110–121, 2020.
- MORSELLI, L. B. G. A. *et al.* Lodo de Estação de Tratamento de água: Possibilidade de Aplicação no Solo. *Scientia Plena*, v. 18, 2022.
- MWALIKENGA, M. K.; VITAL, F. A. C. Perfil de Contaminação das Águas e Peixes por Metais Pesados e suas Consequências para a Saúde Humana. *Revista Brasileira de Ciências Biomédicas*, v. 1, n. 1, p. 16-23, 2020.
- NIVA, C. C.; BROWN, G. G. Ecotoxicologia Terrestre: Métodos e Aplicações dos Ensaio com Oligoquetas. In: *Ecotoxicologia Terrestre: Métodos e Aplicações dos Ensaio com Oligoquetas*. EMBRAPA, p. 23-76, 2019.
- NGUYEN, M. D. *et al.* Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, v. 28, 2022.
- NGWESE, M. M. *et al.* Diagnostic Techniques of Soil-Transmitted Helminths: Impact on Control Measures. *Tropical Medicine and infectious Disease*, v. 5, 2020.
- NUNES, F. K. M. Influência do composto à base de Fibra de Coco nas Propriedades uímicas do Solo de um Plantio de Coqueiro Anão Verde em Santa Izabel do Pará. *Universidade Rural da Amazônia*, Belém, Amazônia, Trabalho de Conclusão de Curso, 2021.
- ODIMEGWU, T. C. *et al.* Review on Different Beneficial Ways of Applying Alum Sludge in a Sustainable Disposal Manner. *Civil Engineering Journal*, v. 4, n. 9, p. 2230–2241, 2018.
- OGLIARI, A. J., *et al.* Ecotoxicological Evaluation of Forest Biomass Ash on Springtails and Earthworms in Subtropical Soils of Brazil. *Journal of Agricultural Studies*, v. 8, n. 1, p. 208-226, 2020.
- ORTIZ, D. C. *et al.* Diversity of springtails (Collembola) in agricultural and forest systems in Southern Santa Catarina. *Biota Neotropica*, v. 19, n. 3, 2019.
- PEDUTO, T. A. G.; JESUS, T. A.; KOHATSU, M. Y. Sensibilidade de diferentes

sementes em ensaio de fitotoxicidade. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v. 4, n. 2, p. 200-212, 2019.

PHAM, P. N. *et al.* Properties of mortar incorporating untreated and treated drinking water treatment sludge. *Construction and Building Materials*, v. 280, 2021.

PORTELA, K. F. *et al.* Caracterização Físico-Química do lodo Centrifugado da Estação de Tratamento de Água Passaúna - Curitiba/ PR. *22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental*, Joinville, 2003.

QRENAWI, L. I.; RABAH, F. K. J. Sludge management in water treatment plants: literature review. *International Journal of Environment and Waste Management*, v. 27, n. 1, p. 93 - 123, 2021.

RAK, J. R.; KUCHARSKI, B. Sludge Management in Water Treatment Plants. *Environment Protection Engineering*, v. 35, n. 2, p. 15–21, 2009.

RIBEIRO, P. L. *et al.* Water treatment residuals for ameliorating sandy soils: Implications in environmental, soil and plant growth parameters. *Geoderma*, v. 407, 2022.

ROBLES, I. *et al.* Inactivation of helminth eggs in an electro-Fenton reactor: Towards full electrochemical disinfection of human waste using activated carbon. *Chemosphere*, v. 250, 2020.

ROCHA, M. C. V.; BARÉS, M. E.; BRAGA, M. C. B. Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge. *Water Research*, v. 103, p. 245–255, 2016.

ROSSIANA, N. *et al.* Using *Daphnia magna* Straus to monitor toxicity of sustainable oil sludge bio-phytoremediation. *E3S Web of Conferences*, v. 249, 2021.

SANTOS, C. T. C. Proposição de Alternativa para a Desinfecção de Água no Campus Central da UFRN. *Universidade Federal do Rio Grande do Norte*, Natal, Trabalho de Conclusão de Curso, 2020.

SANTOS, L. A. R. *et al.* Verificação Da Produção De Lodo De Eta Em Função Da Quantidade E Da Qualidade Da Água Bruta. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 2, p. 235–258, 2021.

SANTOS, T.; SOMMAGGIO, L. R. D.; MARIN-MORALES, M. A. Phyto-genotoxicity assessment of different associations between sludges from Water and Sewage Treatment Plants, before and after the bioremediation process. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 26, p. 40029–40040, 2022.

SHAHIN, S. A.; MOSSAD, M.; FOUAD, M. Evaluation of copper removal efficiency using water treatment sludge. *Water Science and Engineering*, v. 12, n. 1, p. 37–44, 2019.

SHARMA, P. *et al.* Critical review on microbial community during in-situ bioremediation of heavy metals from industrial wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, v. 24, 2021.

SILVA, R. P. T.; BORTTREL, E. C.; PEREIRA, R. O. Possibilidades De Utilização Dos Resíduos De Estação De Tratamento De Água: Estudo De Caso Eta-Jf/Mg. *Universidade Federal de São João Del-Rei*, 2018.

SOBRINHO, M. A. M. *et al.* Geração, Tratamento e Disposição Final dos Resíduos das Estações de Tratamento de Água do Estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 4, p. 761–771, 2019.

SOMMAGGIO, L. R. D. *et al.* Evaluation of the potential agricultural use of biostimulated sewage sludge using mammalian cell culture assays. *Chemosphere*, v. 199, p. 10–15, 2018a.

SOMMAGGIO, L. R. D. *et al.* Ecotoxicological and microbiological assessment of sewage sludge associated with sugarcane bagasse. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 147, p. 550–557, 2018b.

SPECIAN, A. M. *et al.* Ocorrência de bactérias heterotróficas, coliformes totais e *Escherichia coli* em amostras de água de abastecimento público de dois municípios do Estado de São Paulo. *BEPA*, v. 18, n. 205, p. 13 – 22, 2021.

TEIXEIRA, K. C. *et al.* Tratamento de água para abastecimento público utilizando pré-oxidação com ácido peracético e coagulação com sulfato de alumínio. *Conjecturas*, v. 22, n. 1, p. 1505–1519, 2022.

TINA, J. K. Impacto de inseticidas sobre o comportamento de colêmbolos *Folsomia candida* (COLLEMBOLA). *Universidade Federal da Fronteira do Sul*, Chapecó, Trabalho de Conclusão de Curso, 2021.

TKACZYK, A. *et al.* *Daphnia magna* model in the toxicity assessment of pharmaceuticals: A review. *Science of the Total Environment*, v. 763, 2021.

TONY, M. A. Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of “The 5 Rs’ criteria”. *Applied Water Science*, v. 12, n. 2, 2022.

TRAAS, T. P.; VAN-LEEUEWEN, C. J. Ecotoxicological Effects. *In: Risk Assessment of Chemicals*, 281-282, 2007.

TURCHIULI, C.; FARGUES, C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability. *Chemical Engineering Journal*, v. 103, p. 123-131, 2004.

TYAGI, M.; FONSECA, M. M. R.; CARVALHO, C. C. C. R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, v. 22, n. 2, p. 231–241, 2011.

USEPA. *Ecological Effects Test Guidelines* (OPPTS 850.4200). Seed Germination Root Elongation Toxicity Test, 1996.

WEI, L.; TOGBIN, C. The impact of humidity on physicochemical and properties of the compost. *Journal of Ecology*, v. 24, n. 11, p. 2656 – 2663, 2004.

WRIGHT, D. A.; WELBOURN, P. Methodological Approaches. *Environmental Toxicology*, p. 97-217, 2002.

ZHANG, C. *et al.* Ecotoxicology of strobilurin fungicides. *Science of the Total Environment*, v. 742, 2020.