

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE - UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**VALORIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UTILIZAÇÃO DO LODO
DE ETE DA INDÚSTRIA TÊXTIL E CINZA DE CALDEIRA COMO BIOSÓLIDOS**

VANESSA TANK

JOINVILLE, SC
2024

VANESSA TANK

**VALORIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: UTILIZAÇÃO DO LODO
DE ETE DA INDÚSTRIA TÊXTIL E CINZA DE CALDEIRA COMO BIOSSÓLIDOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de processos, na Universidade da Região de Joinville.

Orientadora: Profa. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia

Coorientadora: Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck

JOINVILLE, SC

2024

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

T165v	<p>Tank, Vanessa</p> <p>Valorização sustentável de resíduos industriais: utilização do lodo de ETE da indústria têxtil e cinza de caldeira como biossólidos / Vanessa Tank; orientadora Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia; coorientadora Dra. Elisabeth Wisbeck. – Joinville: UNIVILLE, 2024.</p> <p>82 p.: il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Resíduos industriais – Aspectos ambientais. 2. Lodo residual. 3. Indústria têxtil. I. Maia, Bianca Goulart de Oliveira (orient.). II. Wisbeck, Elisabeth (coorient.). III. Título.</p> <p>CDD 628.4</p>
-------	---

Termo de Aprovação

“Valorização Sustentável de Resíduos Industriais: Utilização do Lodo de ETE da Indústria Têxtil e Cinza de Caldeira como Biossólidos”

por

Vanessa Tank

Banca Examinadora:

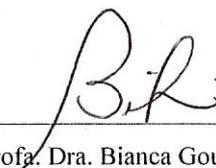
Profa. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia
Orientadora (UNIVILLE)

Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck
Coorientadora (UNIVILLE)

Prof. Dr. Samuel Carlos Ferreira de Melo Júnior
(UFJF)

Prof. Dr. João Carlos Ferreira de Melo Júnior
(UNIVILLE)

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.



Profa. Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Joinville, 03 de setembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

À minha orientadora, Prof^a Dra. Bianca Goulart de Oliveira Maia, pela amizade, parceria, confiança e incentivo ao longo desta jornada. Sua orientação foi fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

À minha co-orientadora, Prof^a Dra. Elisabeth Wisbeck, por compartilhar seu vasto conhecimento e dedicação ao trabalho. Sua expertise foi inestimável para o sucesso desta pesquisa.

Aos bolsistas Enzo e Geasi, pelo valioso auxílio na parte experimental. Sem a ajuda de vocês, não teria sido possível conduzir esta pesquisa de maneira tão eficaz.

À Döhler S/A e ao Sr. José Mário Gomes Ribeiro, por acreditarem em meu potencial e apoiarem minha trajetória acadêmica.

Ao meu colega de trabalho, Luciano Wiggers, por seu apoio constante e disponibilidade para ajudar em diversos momentos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À UNIVILLE, ao corpo docente do mestrado em Engenharia de Processos, pelo conhecimento compartilhado e pelas amizades construídas ao longo do curso. Agradeço também aos funcionários da universidade pela disponibilidade e acessibilidade, bem como pela concessão da bolsa PICPG.

À minha família, que sempre me apoiou incondicionalmente e esteve ao meu lado em todos os momentos. Seu amor e suporte foram essenciais para a minha perseverança e sucesso.

Aos amigos que incansavelmente me ofereceram suporte emocional ao longo deste processo, meus sinceros agradecimentos. Sua presença e encorajamento fizeram toda a diferença.

Ao meu eterno namorado, Bruno Giacomo Storti, que sem dúvida foi o maior e melhor apoio durante toda esta jornada. Sua paciência, amor e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho.

A todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desta dissertação, meus sinceros agradecimentos. Suas contribuições foram valiosas e sou profundamente grata por cada gesto de apoio e colaboração.

A todos, meus sinceros agradecimentos,

Vanessa Tank

RESUMO

Um dos desafios enfrentados pela indústria têxtil é a grande quantidade de lodo gerado, principalmente nos processos úmidos, como alveijamento, engomagem e tinturaria. Esse lodo, composto por materiais orgânicos e inorgânicos, é um subproduto do tratamento biológico e físico-químico dos efluentes, resultando em uma massa úmida conhecida como "torta" ou "lodo", geralmente desidratada e enviada para aterros industriais. Outro resíduo significativo em diversas indústrias é a cinza de caldeira, que, assim como o lodo, também tem como destino comum os aterros sanitários. No entanto, conforme orientado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), essa destinação deve ser a última alternativa. Uma opção para a valorização desses resíduos é sua reutilização como biossólidos. Neste contexto, a presente pesquisa avaliou os instrumentos legais para a reutilização desses materiais e conduziu testes qualitativos (substâncias químicas), de germinação de *Eucalyptus grandis* em presença de lodo (50% e 100%), bem como o plantio de *Eucalyptus grandis* e Manacá (*Pteroma mutabile*) em diferentes proporções de lodo, cinza e solo comercial (M1: 50% lodo + 50% solo, M2: 40% lodo + 30% cinzas + 30% solo, M3: 70% lodo + 30% cinza e Cs: 100% solo comercial). A pesquisa também incluiu avaliações de ecotoxicidade e qualidade microbiológica das misturas. Os resultados mostraram que, com relação as substâncias químicas o lodo e a cinza estão em conformidade. As sementes de *E. grandis* não germinaram na presença de 100% de lodo têxtil, enquanto na mistura com 50% de lodo houve uma germinação de 39%, embora de forma tardia em comparação ao controle. No plantio, a presença dos resíduos não interferiu no Índice de Robustez (IR) em ambas as espécies. Para o Manacá, em relação ao Aumento de Altura (AH) o tratamento M1 apresentou desempenho similar ao controle, enquanto M2 e M3 mostraram crescimento inferior, mas sem anormalidades no IR. Para o Eucalypto, M1 resultou em maior AH que o controle, M2 apresentou menor crescimento, e M3 manteve-se igual ao controle. O IQD foi calculado para M1, resultando em 0,84 para Manacá e 0,25 para Eucalypto, valores dentro dos padrões estabelecidos na literatura e superiores em relação ao controle para o eucalypto (0,17). Nos testes de toxicidade com *D. magna*, os resultados para o ensaio agudo foram de 2 FD para o controle solo e M1, e 4 FD para M2 e M3. No teste crônico, não houve mortes nem presença de machos, porém todas as misturas mostraram resultados estatisticamente diferentes do controle em relação a fecundidade. Nos testes com sementes de rúcula (*E. sativa*), não foram observadas diferenças significativas no índice de germinação (%G) entre o controle e os tipos de solo utilizados, mas o comprimento da raiz foi menor em M1, M2 e M3 em comparação ao controle. Para a parte aérea, M1 foi o único solo que apresentou menor crescimento, enquanto M2 e M3 ficaram estatisticamente iguais ao controle. Na qualidade microbiológica, o lodo e as misturas de lodo e cinza (M1, M2 e M3) apresentaram coliformes acima do permitido, enquanto o solo testado apresentou coliformes dentro dos limites permitidos. A cinza foi o único material testado que não apresentou coliformes. Conclui-se que a utilização dos resíduos pode ser viável, porém, é necessário aplicar tratamentos adicionais para melhorar a qualidade microbiológica. Além disso, os testes de toxicidade são fundamentais para avaliar as possíveis reações dos organismos presentes no meio ambiente, prevenindo impactos ecológicos adversos.

Palavras-chave: Valorização de resíduos, lodo têxtil, cinza de caldeira, biossólidos.

ABSTRACT

Sustainable valorization of industrial waste: use of effluent treatment plant sludge from the textile industry and boiler ash as biosolids

One of the challenges faced by the textile industry is the large amount of sludge generated, particularly in wet processes such as bleaching, sizing, and dyeing. This sludge, composed of organic and inorganic materials, is a byproduct of the biological and physico-chemical treatment of effluents, resulting in a wet mass known as "slurry" or "sludge", which is generally dehydrated and sent to industrial landfills. Another significant residue in various industries is boiler ash, which, like sludge, is also commonly disposed of in sanitary landfills. However, as guided by the National Solid Waste Policy (PNRS), this disposal should be the last resort. One option for valorizing these residues is their reuse as biosolids. In this context, the present research evaluated the legal instruments for the reuse of these materials and conducted qualitative tests (chemical substances), germination tests of *Eucalyptus* (*Eucalyptus grandis*) in the presence of sludge (50% and 100%), as well as the planting of *Eucalyptus grandis* and Manacá (*Pteroma mutabile*) in different proportions of sludge, ash, and commercial soil (M1: 50% sludge + 50% soil, M2: 40% sludge + 30% ash + 30% soil, M3: 70% sludge + 30% ash, and Cs: 100% commercial soil). The research also included ecotoxicity and microbiological quality evaluations of the mixtures. The results showed that, concerning chemical substances, the sludge and ash are in compliance. *E. grandis* seeds did not germinate in the presence of 100% textile sludge, while in the mixture with 50% sludge, there was a 39% germination, although delayed compared to the control. In the planting tests, the presence of residues did not interfere with the Robustness Index (RI) in both species. For Manacá, regarding Height Increase (HI), the M1 treatment performed similarly to the control, while M2 and M3 showed lower growth but no abnormalities in RI. For *Eucalyptus*, M1 resulted in greater HI than the control, M2 showed lower growth, and M3 remained equal to the control. The Quality Index (QI) was calculated for M1, resulting in 0.84 for Manacá and 0.25 for *Eucalyptus*, values within the standards established in the literature and higher compared to the control for *Eucalyptus* (0.17). In the toxicity tests with *D. magna*, the results for the acute assay were 2 FD for the control soil and M1, and 4 FD for M2 and M3. In the chronic test, there were no deaths or the presence of males, but all mixtures showed statistically different results from the control regarding fecundity. In the tests with arugula seeds (*E. sativa*), no significant differences were observed in the germination index (%G) between the control and the types of soil used, but root length was shorter in M1, M2, and M3 compared to the control. For the aerial part, M1 was the only soil that showed less growth, while M2 and M3 were statistically equal to the control. In terms of microbiological quality, the sludge and sludge-ash mixtures (M1, M2, and M3) had coliforms above the permitted levels, while the tested soil had coliforms within permissible limits. Ash was the only material tested that did not show coliforms. It is concluded that the use of residues may be feasible; however, additional treatments are necessary to improve microbiological quality. Moreover, toxicity tests are crucial to assess the possible reactions of organisms present in the environment, preventing adverse ecological impacts.

Keywords: Valorization of waste, textile sludge, boiler ash, biosolids.

RESUMEN

Valorización sostenible de residuos industriales: utilización del lodo de la planta de tratamiento de efluentes de la industria textil y ceniza de caldera como biosólidos

Uno de los desafíos que enfrenta la industria textil es la gran cantidad de lodo generado, principalmente en los procesos húmedos, como el blanqueo, el apresto y la tintorería. Este lodo, compuesto de materiales orgánicos e inorgánicos, es un subproducto del tratamiento biológico y fisicoquímico de los efluentes, resultando en una masa húmeda conocida como "torta" o "lodo", que generalmente se deshidrata y se envía a vertederos industriales. Otro residuo significativo en diversas industrias es la ceniza de caldera, que, al igual que el lodo, también suele tener como destino común los vertederos sanitarios. Sin embargo, según lo orientado por la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), esta disposición debe ser la última alternativa. Una opción para la valorización de estos residuos es su reutilización como biosólidos. En este contexto, la presente investigación evaluó los instrumentos legales para la reutilización de estos materiales y llevó a cabo pruebas cualitativas (sustancias químicas), de germinación de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) en presencia de lodo (50% y 100%), así como la siembra de *Eucalyptus grandis* y Manacá (*Pteroma mutabile*) en diferentes proporciones de lodo, ceniza y suelo comercial (M1: 50% lodo + 50% suelo, M2: 40% lodo + 30% ceniza + 30% suelo, M3: 70% lodo + 30% ceniza y Cs: 100% suelo comercial). La investigación también incluyó evaluaciones de ecotoxicidad y calidad microbiológica de las mezclas. Los resultados mostraron que, en cuanto a las sustancias químicas, el lodo y la ceniza están en conformidad. Las semillas de *E. grandis* no germinaron en presencia de un 100% de lodo textil, mientras que en la mezcla con un 50% de lodo hubo una germinación del 39%, aunque de forma tardía en comparación con el control. En la siembra, la presencia de los residuos no interfirió en el Índice de Robustez (IR) en ambas especies. Para el Manacá, en cuanto al Aumento de Altura (AH), el tratamiento M1 mostró un rendimiento similar al control, mientras que M2 y M3 mostraron un crecimiento inferior, pero sin anomalías en el IR. Para el Eucalipto, M1 resultó en un mayor AH que el control, M2 presentó menor crecimiento y M3 se mantuvo igual al control. El IQD se calculó para M1, resultando en 0,84 para Manacá y 0,25 para Eucalipto, valores dentro de los estándares establecidos en la literatura y superiores en comparación con el control para el eucalipto (0,17). En las pruebas de toxicidad con *D. magna*, los resultados del ensayo agudo fueron de 2 FD para el control del suelo y M1, y 4 FD para M2 y M3. En la prueba crónica, no hubo muertes ni presencia de machos, pero todas las mezclas mostraron resultados estadísticamente diferentes al control en cuanto a fecundidad. En las pruebas con semillas de rúcula (*E. sativa*), no se observaron diferencias significativas en el índice de germinación (%G) entre el control y los tipos de suelo utilizados, pero la longitud de la raíz fue menor en M1, M2 y M3 en comparación con el control. En cuanto a la parte aérea, M1 fue el único suelo que presentó menor crecimiento, mientras que M2 y M3 fueron estadísticamente iguales al control. En cuanto a la calidad microbiológica, el lodo y las mezclas de lodo y ceniza (M1, M2 y M3) presentaron coliformes por encima de lo permitido, mientras que el suelo testado presentó coliformes dentro de los límites permitidos. La ceniza fue el único material probado que no presentó coliformes. Se concluye que la utilización de los residuos puede ser viable, pero es necesario aplicar tratamientos adicionales para mejorar la calidad microbiológica. Además, las pruebas de toxicidad son fundamentales para evaluar las posibles reacciones de los organismos presentes en el medio ambiente, previniendo impactos ecológicos adversos.

Palabras clave: Valorización de residuos, lodo textil, ceniza de caldera, biosólidos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo produtivo e geração de efluentes da indústria têxtil.	18
Figura 2: Fluxograma simplificado da metodologia adotada.	28
Figura 3: Placa semeada na condição 100% lodo têxtil (esquerda) e placas com mudas nativas (direita).	31
Figura 4: Esquema da formulação dos substratos (% m/m).	33
Figura 5: Representação esquemática do teste de ecotoxicidade em meio aquoso.	36
Figura 6: Montagem do teste com Eruca sativa.	38
Figura 7: Fluxograma dos instrumentos legais aplicáveis para a reutilização de resíduos em Santa Catarina, Brasil.	41
Figura 8: Acompanhamento da germinação do eucalipto 20 dias após preparo do teste. Placa contendo substrato comercial (esquerda); Placa contendo 50% de lodo (meio); Placa contendo 100% lodo (direita).	44
Figura 9: Manacá-da-serra após 60 dias de teste.	45
Figura 10: Comparação dos valores de Índice de Robustez (IR) inicial e final e Aumento (ganho) da altura (AH) entre as misturas C (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para Manacá (A) e Eucalipto (B). Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.	46
Figura 11: Recipientes contendo mudas de Manacá e Eucalipto no início e no final do experimento com os tipos de solo C (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza).	48
Figura 12: Média de fecundidade dos organismos <i>D. magna</i> para os tratamentos Controle Teste (CT) (água de cultivo), Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza). Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.	52
Figura 13: Comparação dos Índices de Germinação (%G), comprimento de raiz (mm) e comprimento de parte aérea (mm) entre as misturas CT (controle do teste ou padrão) Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para as sementes de rúcula submetidas no teste. Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.	54
Figura 14: Comparação dos Índices de Alongamento de Raiz (%R) e Índice de Germinação (IG) entre as misturas CT (controle do teste ou padrão) Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para as sementes de rúcula submetidas no teste. Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Levantamento dos insumos utilizados na indústria têxtil.	19
Tabela 2: Espécies nativas (MA) utilizadas no teste de plantio.	32
Tabela 3: Análise das substâncias químicas e pH do lodo têxtil e da cinza de caldeira e valor máximo permitido no biossólido segunda o Conama 498/20.	42
Tabela 4: Resultado do IQD das mudas de Manacá e Eucalipto submetidas aos tipos de solo Controle (100% solo comercial) e M1 (50% lodo + 50% solo comercial).	48
Tabela 5: Ajustes de pH realizados nos extratos solubilizados nas amostras controle (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza).	49
Tabela 6: Resultados dos ensaios de toxicidade aguda para <i>D. magna</i> nas amostras Controle (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial), M3 (70% lodo + 30% cinza) e Padrão (água de cultivo)	50
Tabela 7: Resultado do teste de qualidade microbiológica.	56
Tabela 8: Análise físico-química da massa bruta do lodo têxtil.	73
Tabela 9: Análise química do extrato lixiviado do lodo têxtil.	74
Tabela 10: Análise química do extrato solubilizado do lodo têxtil.	76
Tabela 11: Análise físico-química da massa bruta da cinza.	77
Tabela 12: Análise química no extrato lixiviado da cinza.	78
Tabela 13: Análise química no extrato solubilizado da cinza.	80

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIT: Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
CLASSE I: Resíduo sólido classificado como perigoso perante NBR 10004/04
CLASSE IIA: Resíduo sólido classificado como não perigoso e não inerte perante NBR 10004/04
CLASSE IIB: Resíduo sólido classificado como não perigoso e inerte perante NBR 10004/04
CLASSE I: Resíduo sólido classificado como perigoso perante NBR 10004/04
CEO: Concentração de Efeito Observado
CENO: Concentração de Efeito Não Observado
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA: Conselho Estadual do Meio Ambiente
DC: Diâmetro de Coletor
ETE: Estação de Tratamento de Efluentes
FATMA: Fundação do Meio Ambiente
FT: Fator de Toxicidade
H: Altura
HCL: Ácido Clorídrico
IMA: Instituto do Meio Ambiente
IN: Instrução Normativa
ISO: International Organization for Standardization
IPEF: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
IQD: Índice de Qualidade Dickson
LT: Lodo Têxtil
M1: Mistura 1
M2: Mistura 2
M3: Mistura 3
NAOH: Hidróxido de Sódio
NBR: Norma Brasileira Regulamentadora
NMP: Número Mais Provável
NPK: Nitrogênio, Fósforo e Potássio
PIB: Produto Interno Bruto
PMSPA: Peso da Matéria Seca da Parte Aérea
PMSR: Peso da Matéria Seca das Raízes
PMST: Peso da Matéria Seca Total
PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC: Policloreto de Vinila
pH: Potencial Hidrogeniônico
RS: Resíduo Sólido
RSI: Resíduo Sólido Industrial
SC: Santa Catarina
ST: Sólido Total
USP: Universidade de São Paulo
UV: Radiação Ultravioleta

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1 Resíduos Sólidos.....	15
3.2 Indústria Têxtil.....	16
3.2.1 Lodo Têxtil.....	19
3.2.2 Cinzas de Caldeiras.....	20
3.4 Valorização de Resíduos e Instrumentos Legais.....	22
3.5 Disposição de Lodo em Solo.....	24
3.6 Importância da Valorização de Resíduos Industriais.....	26
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 Coleta e Preparação do Lodo Têxtil.....	28
4.2 Coleta e Preparação da Cinza de Caldeira.....	29
4.3 Obtenção e Preparo do Solo.....	30
4.4 Classificação e Caracterização Físico-química do Lodo Têxtil e Cinza de Caldeira.....	30
4.5 Teste 1 de Plantio.....	30
4.5.1 Teste de Germinação de Eucalipto e Plantio de Espécies Nativas.....	31
4.6 Preparo das Misturas de Lodo, Cinza e Solo.....	33
4.7 Teste 2 de Plantio.....	33
4.7.1 Teste de Plantio de <i>Eucalyptus grandis</i> e Plantio de espécie nativa.....	34
4.8 Teste de Ecotoxicidade nas Misturas e no Extrato Solubilizado.....	35
4.8.1 Obtenção do Extrato Solubilizado das Condições Testadas.....	35
4.9 Qualidade Microbiológica Lodo, Cinza, Solo e Misturas.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 Classificação dos Resíduos.....	40
5.1.1 Classificação do Lodo Têxtil e da Cinza de Caldeira.....	41
5.2 Caracterização Substâncias Químicas e pH do Lodo e Cinza.....	42
5.3 Teste 1 de Plantio.....	44
5.4 Teste 2 de Plantio.....	46
5.5 Ecotoxicidade Aguda com <i>Daphnia magna</i>	50
5.6 Ecotoxicidade Crônica com <i>Daphnia magna</i>	52
5.7 Ecotoxicidade com sementes de <i>Eruca sativa</i>	54
5.8 Qualidade Microbiológica Lodo, Cinza, Solo e Misturas.....	58
6. CONCLUSÃO.....	59
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS.....	62
ANEXOS.....	74

INTRODUÇÃO

No setor têxtil global, o Brasil se destaca como um dos principais produtores de matéria-prima e, conseqüentemente, de tecidos. Atualmente, ocupa a quinta posição, com as maiores indústrias têxteis do mundo e sendo responsável por suprir 2,4% da demanda global. Essa colocação fica atrás apenas do Paquistão (3,60%), Estados Unidos (5,30%), Índia (6,90%) e China (50,20%) (GOTEX, 2017). Além disso, de acordo com dados divulgados pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2022), o setor têxtil é o segundo maior empregador da indústria brasileira, sendo o primeiro maior a indústria alimentícia.

É de conhecimento geral que todas as atividades industriais, em diferentes escalas, entre pequena, média ou grande, geram impactos ambientais. Isso ocorre devido à extração e utilização de recursos naturais, processos de modificação e beneficiamento, além dos resíduos gerados durante a produção (GALEMBECK, 2013). E a indústria têxtil não foge a essa realidade.

Apesar de contribuir significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) do país e gerar milhões de empregos diretos e indiretos, o setor têxtil enfrenta desafios ambientais consideráveis devido ao seu rápido crescimento produtivo. Um desses desafios é a geração de uma quantidade expressiva de Resíduos Sólidos Industriais (RSI), que inclui o lodo têxtil gerado nas Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) e a cinza proveniente da queima de biomassa para gerar vapor necessário aos equipamentos (ZONATTI, 2015). A gestão sustentável desses resíduos tornou-se uma prioridade, à medida que se busca mitigar o impacto ambiental do setor têxtil e promover práticas mais responsáveis.

A indústria têxtil é também conhecida por utilizar grandes volumes de água em seus processos de beneficiamento e pelo consumo significativo de energia elétrica e vapor em suas operações. É na etapa do beneficiamento/acabamento que ocorre o maior consumo de água e conseqüentemente a maior geração de efluentes na indústria, valores que variam de 50 a 200 L de água para produção de 1 kg de tecido, sendo que 80% deste volume é descartado como efluente (ARSLAN-ALATON *et al.*, 2008; IMMICH, 2006; SILVA & ANDRADE, 2013).

O somatório dos efluentes gerados nos diferentes processos é encaminhado para a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria e resulta em um lodo biológico que apresenta em sua composição, parte das substâncias utilizadas nos

processos (GUARATINI & ZANONI, 2000). Este lodo é então classificado como um resíduo sólido perante a Norma Brasileira (NBR) 10.004/2004, e por ser de origem industrial seu lançamento em rede pública de esgoto ou corpos d'água são inviáveis.

Esse resíduo apresenta uma composição química variada devido aos diferentes produtos utilizados nos processos têxteis, como amidos, óleos lubrificantes, amaciantes, detergentes, corantes, alvejantes, solventes, entre outros, e devido a isso o resíduo requer uma destinação final adequada, como em um aterro industrial (VON SPERLING, 2007). Na empresa estudada, a geração de lodo diária é em média de 12 toneladas, podendo atingir até 15 toneladas. Logo, o descarte do lodo tornou-se um grande desafio, pois a quantidade produzida aumenta proporcionalmente à medida que a população e indústrias crescem (Gonzaga, *et al.*, 2018), conseqüentemente essa prática acarreta problemas ambientais e grandes custos para as empresas e concessionárias (BORTOLUZZI *et al.*, 2012).

No que diz respeito à elevada demanda de energia na indústria têxtil, esta também decorre dos processos de beneficiamento de tecidos, tais como tingimento, secagem e fixação de corantes. Essa intensa necessidade energética é atendida por meio de várias fontes, sendo a energia térmica e a eletricidade as mais amplamente empregadas (CUBI ENERGIA, 2022).

A oscilação nos custos da energia elétrica está ligada às variações na oferta e demanda. No contexto brasileiro, em particular, essa demanda é fortemente influenciada por fenômenos climáticos, visto que mais de 50% da matriz energética do país é proveniente de fontes hidrelétricas (EPE, 2021). Como resultado, empresas têm optado por diversificar suas fontes de energia para abastecer seus processos, incluindo a utilização de termelétricas (biomassa, carvão, gás natural, entre outras) (PRETO & MORTOZA, 2010).

O Brasil possui vantagens na geração de energia a partir da biomassa, incluindo clima favorável, abundância de água e espaço disponível para cultivos energéticos sem competir com a produção de alimentos. Além disso, melhorias tecnológicas nas conversões de biomassa e o desenvolvimento de novas fontes, como gramíneas e florestas de crescimento rápido, estão reduzindo os custos e expandindo a produção de bioenergia no país (RUIZ, 2015).

Embora o uso de biomassas apresente benefícios, é importante destacar que sua utilização também resulta na produção de cinzas. Essas cinzas são

consideradas resíduos sólidos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), e, portanto, requerem um processo de descarte apropriado. A cinza, dependendo de sua origem, pode conter quantidades significativas de minerais, como potássio, sódio, zinco, cálcio, magnésio e ferro, além de contribuir para a redução da acidez do solo. Isso a torna uma opção viável para ser utilizada na agricultura, uma vez que pode enriquecer o solo com elementos minerais essenciais e regular o pH (SEVERINO *et al.*, 2006; BASU *et al.*, 2009).

Em busca de soluções para o desafio de destinar os subprodutos gerados pela indústria, pesquisas têm sido realizadas para desenvolver métodos alternativos de tratamento e disposição dos resíduos, visando a gestão ambientalmente responsável. Dentre essas abordagens, destacam-se a compostagem e a disposição em solos florestais (POLASTRI *et al.*, 2018), especialmente para resíduos como cinzas de caldeira e lodo de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE). Esses métodos se sobressaem devido às suas vantagens distintas. São processos relativamente simples, com baixo consumo de energia, que permitem a reciclagem dos componentes químicos e orgânicos presentes nos resíduos, algo que não é viável com métodos como a incineração (COSTA *et al.*, 2016).

Dentro deste contexto, portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e da cinza da caldeira de uma indústria têxtil como biossólidos para o plantio de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill (ex. Maiden) e uma espécie nativa na Mata Atlântica (*Pleroma mutabile* (vell.) Triana). Assim, este trabalho visou reduzir a necessidade de insumos agrícolas no cultivo dessas espécies e minimizar a disposição final do lodo em aterros industriais, que, além de serem onerosos em termos de gestão e manutenção, também representam riscos ao meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Utilizar o lodo da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e a cinza da caldeira da indústria têxtil como biossólidos para o plantio de mudas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e uma espécie nativa da Mata Atlântica (manacá-da-serra (*Pleroma mutabile*)).

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as propriedades físico-químicas e classificar o lodo proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria, juntamente com o resíduo cinza de caldeira;
- Realizar a semeadura de *Eucalyptus grandis* em diferentes concentrações de lodo e solo comercial;
- Executar o plantio de diferentes espécies nativas da Mata Atlântica no lodo têxtil em diferentes concentrações para identificar espécies com potencial resistência ao lodo;
- Realizar o plantio de mudas de *Eucalyptus grandis* e a espécie nativa definida na etapa anterior (*Pleroma mutabile*) em diferentes proporções de lodo:cinza:solo e investigar o potencial fertilizante, utilizando testes fitológicos para avaliar o rendimento da biomassa vegetal;
- Conduzir ensaios de ecotoxicidade utilizando diferentes organismos nas diferentes proporções de lodo:cinza:solo utilizadas no plantio.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos Sólidos

Os vários processos de produção industrial são bastante diversificados e dependendo do tipo de indústria, o processo pode variar com o tipo de resíduos gerados e suas respectivas destinações, ou seja, alguns podem ser recicláveis, reaproveitáveis e aqueles considerados rejeitos (SOUZA, 2017). De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 313/2002, resíduo sólido industrial é:

todo resíduo resultante de atividades industriais e que se encontre nos estados sólido, semissólido, gasoso - quando contido, e líquido – cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e esgoto e aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição.

Dessa maneira, tanto o efluente direcionado à estação de tratamento quanto o lodo resultante do processo de tratamento pode e deve ser classificado como resíduos sólidos (RS).

De acordo com Mota & Almeida (2017), a produção anual brasileira em 2016 foi de 33 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais (RSI), dos quais 25 milhões de toneladas não tiveram tratamento adequado. Já em Santa Catarina, o total de resíduos industriais gerados, entre junho de 2016 e maio de 2017, foi de 5.196.924 toneladas, sendo destas 5.050.078 toneladas de resíduos não perigosos industriais de classe IIA e IIB, que são não inertes e inertes, respectivamente (PERS-SC, 2018).

Quando efluentes de estações de tratamento são liberados no meio ambiente sem tratamento adequado, podem surgir consequências prejudiciais, como a interferência no processo de fotossíntese, o aumento da concentração de matéria orgânica e a turvação da água (turbidez), dificultando a penetração da luz solar. Isso, por sua vez, pode desencadear o processo de eutrofização do corpo hídrico (WACHHOLZ & LIZAMA, 2021). Um desafio comum no tratamento de águas residuais é a produção de lodo. Além de demandar um período considerável para a secagem, a disposição final desse resíduo implica em custos adicionais para a empresa. Nesse contexto, a preocupação ambiental em relação a esse setor industrial se torna evidente (PEDROZA *et al.*, 2010). Adicionalmente, os compostos químicos lançados na água e no solo por meio destes resíduos têm o potencial de causar bioacumulação, apresentando elevada toxicidade para o organismo humano, conforme relatado por Mendes, Dilari e Pelegrini (2015), bem como por Wachholz e Lizama (2021). Esse impacto afeta negativamente os ecossistemas, tornando-o inadequado para utilização.

No que diz respeito à produção de efluentes industriais, uma estimativa feita pelo Banco Mundial indica que a indústria têxtil contribui com cerca de 20% do total de efluentes industriais gerados (KANT, 2012; CRUZ *et al.*, 2019).

3.2 Indústria Têxtil

A presença da indústria têxtil é observada em todos os países devido à necessidade humana de vestuário e à sua ampla gama de aplicações, abrangendo decoração, saúde, setor militar, entre outros (FUJITA & JORENTE, 2015). Por esse

motivo, é reconhecida como uma das pioneiras na industrialização, e continua evoluindo constantemente para atender à crescente demanda, adotando processos mais modernos e eficientes que reduzem significativamente o consumo de água, embora ainda não o eliminem por completo (CARDOSO, 2018).

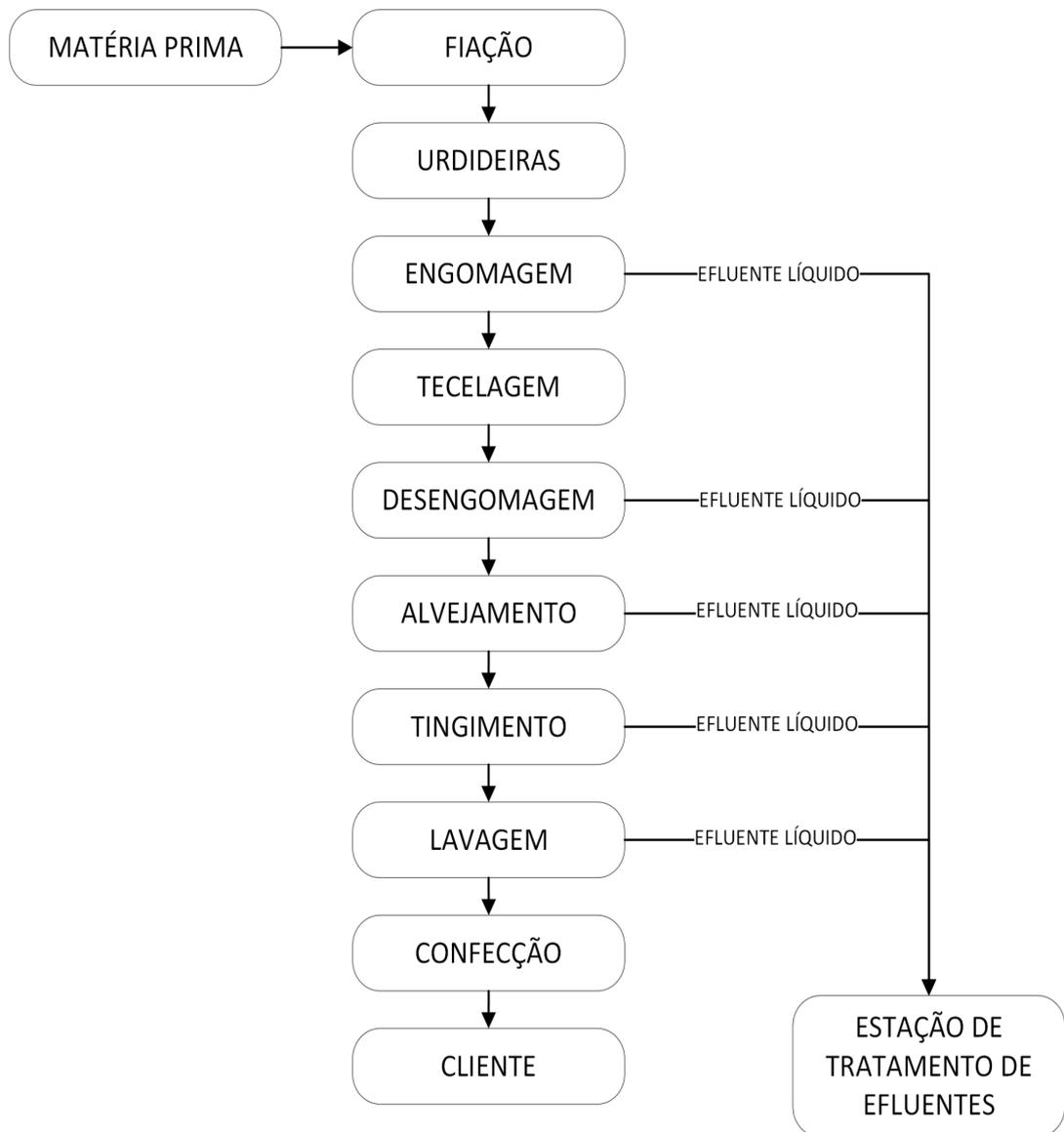
O segmento têxtil desempenha um papel fundamental no cenário econômico do país, onde anualmente gera uma produção de aproximadamente 83 milhões de toneladas (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Atualmente, ela proporciona emprego direto para uma significativa força de trabalho de 1,6 milhão de pessoas, com a maioria delas sendo mulheres, como destacado pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) em 2019. De acordo com a mesma fonte, a indústria da moda ocupa a posição de segundo maior empregador no setor de transformação industrial, desempenhando também um papel crucial como geradora de empregos para aqueles que estão ingressando no mercado de trabalho.

Na esfera do processo, a estrutura constitui uma rede de segmentos produtivos independentes, sendo eles: (a) produção da matéria-prima, (b) fiação, (c) preparação à tecelagem (d) tecelagem, (e) beneficiamento/acabamento, (f) confecção e (g) mercado (RECH, 2008).

Quanto ao consumo de água, aproximadamente 90% do uso total advém do processo de beneficiamento dos produtos (VON SPERLING, 2007), sendo estimado entre 50 e 100 litros por quilograma de tecido produzido, de acordo com Arslan-Alaton *et al.* (2008). Os autores Immich (2006) e Silva & Andrade (2013) indicam que são necessários cerca de 80 litros de água para produzir 1 quilo de tecido. No entanto, outros autores argumentam que o consumo nessas etapas pode variar de 200 a 400 litros por quilograma de tecido (ROBSON *et al.*, 2001).

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do processo produtivo e em quais etapas são gerados efluentes. Cada etapa que resulta na produção de efluentes líquidos requer o uso de produtos químicos, incluindo a Estação de Tratamento de Efluentes em si.

Figura 1: Processo produtivo e geração de efluentes da indústria têxtil.



Fonte: Adaptação de Hassemer (2000) e Costa e Rocha (2009).

Na Tabela 1, é possível consultar as etapas do processo de beneficiamento que envolvem o uso de produtos químicos na indústria, bem como os produtos empregados no tratamento dos efluentes gerados.

Tabela 1: Levantamento dos insumos utilizados na indústria têxtil.

Processo	Produto Químico	Referências
Engomagem	Amido, CMC ou PVA.	ALCÂNTARA, M. R., & DALTIM, D. (1996)
Desengomagem	Peróxido de hidrogênio, hipoclorito de sódio ou clorito de sódio.	SANTOS, B. S. (2023)
Alvejamento	Cloro ou peróxido de hidrogênio.	SANTOS, B. S. (2023)
Tingimento	Corantes ácidos, azóicos, reativos, dispersos etc., umectantes, antiespumantes, sequestrantes, ajustadores de pH, eletrólito e dispersante.	SANTOS, B. S. (2023) e ALCÂNTARA, M. R., & DALTIM, D. (1996)
Lavagem	Detergentes, sabões, sequestrantes e neutralizantes	SANTOS, B. S. (2023)
Tratamento de efluentes	Decolorante, ácido muriático, ácido sulfúrico, sulfato de alumínio, antiespumante, decolorante e cal hidratada.	OLIVEIRA (2008) e CINTRA (2009)

Fonte: elaborado pela autora (2023).

3.2.1 Lodo Têxtil

O lodo têxtil (LT) ou biossólido, é o resíduo sólido resultante do tratamento dos efluentes gerados nos processos úmidos da indústria têxtil, que é essencialmente composto por água, óxidos de minerais e matéria orgânica (GUEDES, 2012).

Devido à presença tanto de materiais orgânicos quanto inorgânicos nos efluentes, a abordagem comum na indústria é a adoção de um sistema de tratamento que combina processos biológicos (normalmente lodos ativados) e técnicas físico-químicas (CUNHA *et al.*, 2019).

O processo de lodo ativado é fundamentado na oxidação bioquímica dos compostos orgânicos e inorgânicos contidos no efluente, sendo mediado por uma comunidade microbiana diversificada. Por outro lado, o processo físico-químico compreende a utilização de agentes químicos, como coagulantes e floculantes (etapa de flotador), para promover a aglomeração e remoção de partículas suspensas, corantes, óleos e outros compostos encontrados nos efluentes têxteis. (BENTO *et al.*, 2005).

Conforme indicado por Santos (2023), o lodo têxtil pode ser considerado uma valiosa fonte de micronutrientes e macronutrientes, devido ao seu significativo conteúdo de matéria orgânica e inorgânica, podendo desempenhar um papel complementar nos adubos contendo nitrogênio, fósforo e potássio (NPK).

O principal efeito físico do biossólido no solo, ocasionado pela alta presença de matéria orgânica, é a melhoria do estado de agregação das partículas, influenciando diretamente na diminuição da densidade, aumento da aeração e retenção de água (MELO & MARQUES, 2000).

É essencial destacar que as propriedades do efluente tratado podem variar substancialmente, pois ele é originado de um processo industrial que não segue um padrão uniforme em sua produção. Essa variabilidade resulta em características químicas do lodo gerado que também não são homogêneas. Portanto, suas propriedades podem variar em função dos materiais e matérias-primas empregados, mas geralmente é categorizado como resíduo de Classe IIA, não sendo perigoso nem inerte, de acordo com Tank *et al.* (2022).

No entanto, de acordo com a pesquisa de Lima (2019), as características de composição do lodo têxtil podem levá-lo a ser classificado como um resíduo de Classe I, considerado perigoso e tóxico de acordo com a norma ABNT 10.004/04. Por essa razão, o LT comumente é destinado para aterros industriais.

Esse tipo de resíduo provoca impactos negativos no meio ambiente e na saúde pública quando não é adequadamente descartado. Estudos têm destacado as questões ambientais associadas ao grande volume de lodo gerado e à necessidade de destinação final apropriada. Por exemplo, a produção têxtil na China gera aproximadamente 20 milhões de toneladas de lodo úmido a cada ano, utilizando métodos tradicionais de tratamento, como floculação e digestão biológica, conforme mencionado por Ran *et al.* (2019), Zou *et al.* (2019) e Liu *et al.* (2020). Contudo, Huang *et al.* (2018) afirmam que esse lodo contém quantidades significativas de energia e nutrientes, apresentando um grande potencial de reutilização.

3.2.2 Cinzas de Caldeiras

As cinzas resultam da queima da biomassa florestal e suas propriedades físicas e químicas dependem das espécies utilizadas, tendo em vista a peculiaridade de poder calorífico que cada espécie possui (ARRUDA, *et al.* 2016).

Durante a queima da biomassa, ocorre a geração de cinzas volantes, conhecidas como "*fly ash*", que consistem em cinzas finas, capturadas por dispositivos de controle de emissões, como filtros e precipitadores eletrostáticos, entre outros. Além disso, são produzidas cinzas mais densas, denominadas "*bottom ash*" ou cinzas de fundo, que são compostas por partículas angulares e porosas, acumulando-se na parte inferior do forno (NIU; TAN; HUI, 2016).

Os elementos predominantes nas cinzas de fundo incluem silício, alumínio, cálcio, ferro, potássio e magnésio. Em contraste, as cinzas volantes, que são mais leves, contêm principalmente potássio, enxofre, cloro e sódio, além de traços de chumbo e zinco (BECIDAN *et al.*, 2012).

Esses elementos estão presentes de forma natural na crosta terrestre, desempenhando papéis vitais nos processos geológicos e biológicos do ecossistema. No entanto, quando ocorrem em concentrações que ultrapassam os limites aceitáveis para os organismos presentes, podem desencadear efeitos tóxicos no ambiente (TSUTIYA, 2015; BIONDI, 2010).

Vastos volumes de cinzas são gerados globalmente. No entanto, a maioria das cinzas de biomassa é descartada, uma vez que seu uso é restrito em vários países, especialmente em aplicações potenciais, como materiais de construção e corretivos de solo. Portanto, é crucial fortalecer a pesquisa para explorar seu potencial (NIU; TAN; HUI, 2016).

Na agricultura moderna, exige-se muito do solo a ponto de exaurir sua fertilidade natural e, assim, a constante reposição de nutrientes é fundamental devido à retirada de nutrientes pelas plantas durante as safras. A aplicação de cinza vegetal em plantios agrícolas é uma forma de se restituir parte de nutrientes já removidos do solo pelas culturas (ANDRADE *et al.*, 2021).

A cinza vegetal é rica em óxidos, hidróxidos e carbonatos de cálcio e magnésio, que se adicionada na quantidade adequada, pode reduzir a acidez do solo, melhorar sua fertilidade, além de adicionar quantidades substanciais de potássio ao solo (HARALDSEN *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2012; NORSTROM *et al.*, 2012).

O emprego de resíduos em cultivos agrícolas é uma prática que não apenas eleva a produção, mas também contribui para solucionar o desafio do descarte de resíduos sólidos. Além disso, ao utilizar resíduos como fertilizantes, diminui-se a

necessidade indireta de depender de rochas calcárias, fosfatadas e até mesmo do petróleo. Estes últimos possuem ciclos geológicos longos e são amplamente empregados na indústria de fertilizantes químicos (BONFIM-SILVA *et al.*, 2013).

3.4 Valorização de Resíduos e Instrumentos Legais

A possibilidade de utilização das alternativas de valorização de resíduos está intimamente ligada à adequação e qualidade dos instrumentos de política ambiental que regem o cenário da gestão de resíduos, os quais têm se tornado cada vez mais rigorosos (GODECKE, 2010).

Com a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/10), as empresas passaram a buscar soluções ecologicamente responsáveis para o processamento e a destinação adequada de seus resíduos. Isso decorreu do fato de que, a partir desse ponto, passaram a ser orientadas por uma hierarquia de prioridades na destinação de resíduos, dando preferência às opções que oferecessem maiores benefícios ambientais (PEREIRA, 2019). A disposição final em aterros, considerada ambientalmente adequada, passou a ser a última escolha a ser adotada somente quando outras alternativas não se mostrassem tecnicamente e economicamente viáveis. Essa crescente preocupação resultou na formulação de legislações específicas destinadas ao reaproveitamento e à correta destinação desses resíduos.

Nesse contexto, o Estado de Santa Catarina, por meio do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA), emitiu em 2017 a Resolução nº 109, estabelecendo diretrizes e critérios para a utilização de resíduos das classes I, IIA ou IIB como insumos em atividades agrícolas, silvicultura, processos industriais ou construções.

Essa resolução, ainda preconiza que é essencial caracterizar os resíduos que serão empregados, fornecendo laudos técnicos de análise que abranjam suas características físico-químicas e ecotoxicológicas, se aplicável, assim como outras análises relevantes para aplicação específica. Além disso, a resolução demanda a classificação do resíduo conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), incluindo laudos técnicos de lixiviação e solubilização. Vale ressaltar que a coleta de amostras deve seguir os protocolos da ABNT 10007 (ABNT, 2004), e as análises devem ser conduzidas em laboratórios reconhecidos pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA), conforme estabelecido pelo Decreto nº 3.754/10, para os parâmetros de interesse

ambiental abordados no estudo. Quanto aos resíduos Classe I, é determinado que não apresentem um fator de toxicidade (FT) maior que 8 quando utilizados diretamente no solo, e um FT superior a 16 para outras aplicações.

Além disso, no ano subsequente, a então Fundação do Meio Ambiente (FATMA) lançou a Instrução Normativa IN nº76/2018 com o objetivo de facilitar a implementação do dispositivo legal para a reutilização de resíduos industriais. Essa instrução estabelece o tipo de licenciamento ambiental exigido para efetivar operacionalizar a atividade, exigindo as mesmas condições dispostas na CONSEMA 109/2017.

Após a implementação da legislação estadual Catarinense, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), exercendo suas atribuições, introduziu a Resolução nº 498/2020, com o objetivo de abordar especificamente a reutilização de biossólidos no solo. Essa legislação trouxe uma nova abordagem para os testes e parâmetros relacionados à incorporação de lodos no solo, priorizando a análise de metais, a determinação da taxa anual de aplicação de acordo com as características físico-químicas do resíduo e impondo restrições ao uso agrícola, com ênfase na preservação da segurança alimentar.

Nos últimos anos, foram desenvolvidos trabalhos de valorização de resíduos industriais utilizando diferentes tipos de resíduos e técnicas, dentre eles, estudos de pesquisa com lodo proveniente de estações de tratamento de indústria têxtil tem se destacado. Fischer (2015), estudou o potencial do uso do lodo de indústria têxtil como biomassa combustível para geração de energia; Testolin *et al.* (2021), utilizou o lodo industrial têxtil como inóculo para degradar corantes recalcitrantes em processo de compostagem; Marangoni *et al.* (2018), avaliou a incorporação de lodo têxtil como substituição ao agregado miúdo na matriz de concreto e Moura *et al.* (2021), avaliou a incorporação de lodo têxtil na massa asfáltica.

Estes trabalhos possuem poucas características atrativas do ponto de vista técnico sob a viabilidade de implantação em escala real, como por exemplo a quantidade da utilização/incorporação do resíduo tendo em consideração os altos valores de geração diários (Marangoni *et al.* (2018); a necessidade de realizar tratamentos térmicos para sua utilização (gasto energético) (Fischer, 2015) ou tratamento com baixo custo, porém longo tempo de maturação, como no caso da compostagem (TESTOLIN *et al.* (2021).

Pesquisadores têm estudado, também, a incorporação *in natura* do lodo têxtil em solos, como Santos *et al.* (2011) com a pesquisa “Lodo têxtil como alternativa ecológica de fertilizante agrícola” e Rosa (2004) que estudou a incorporação do lodo têxtil em solo florestal e avaliou os aspectos físico-químicos, agronômicos e ecotoxicológicos. Ambos obtiveram resultados positivos em suas pesquisas, porém considera-se que há poucas referências sobre esta ótica da reutilização do lodo têxtil. Muitos autores defendem a ideia da incorporação de lodo de estação de tratamento de efluentes sanitários (Teran *et al.*, 2020; Moreira, 2019), que são lodos que tendem a ter maior carga orgânica, mas isso não significa que lodos industriais também não possam ter efeito agronômico. Conseqüentemente, emerge uma lacuna a ser explorada por meio de investigação.

As principais vantagens de reciclar um resíduo são: preservar os recursos naturais (menor consumo de matéria-prima), proteger o meio ambiente (menor quantidade de resíduos a serem dispostos) e poupar energia (no processo de transporte, entre outros) (PAIXÃO, 2023).

3.5 Disposição de Lodo em Solo

A utilização e a gestão segura dos resíduos orgânicos provenientes de estações de tratamento de esgoto são essenciais devido a diversas razões, incluindo preocupações ambientais, restrições de espaço físico e considerações econômicas. Além disso, há uma crescente necessidade de explorar fertilizantes alternativos que não apenas reduzam os custos de cultivo agrícola, mas também ofereçam aos produtores uma gama mais ampla de opções (BERTOLAZI *et al.*, 2017).

Diversas pesquisas têm demonstrado a aplicação no solo do lodo resultante do tratamento de efluentes domésticos e industriais como uma solução economicamente viável e ecologicamente sustentável (Teran *et al.*, 2020; Moreira, 2019). Esses estudos têm como objetivo avaliar o aproveitamento desse resíduo, seja por meio de sua aplicação direta ou por meio de processos de transformação.

A incorporação de lodo proveniente de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) em solos tem recebido cada vez mais notoriedade pois, apresenta vantagens ambientais, econômicas e pode ser considerada uma alternativa para as práticas convencionais de tratamento (incineração, coprocessamento, aterro, dentre outros).

Vale ressaltar também que a destinação ponderada do lodo se faz necessária diante dos problemas que podem advir de seu acúmulo (MARCO, 2011).

No estudo conduzido por Freier *et al.* (2006), foram comparados os efeitos de doses crescentes de biossólidos no crescimento inicial de mudas de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S. Johnson. Após 100 dias do plantio, a análise de variância (ANOVA) revelou um impacto estatisticamente significativo do modo de aplicação do biossólido na altura das mudas de eucalipto.

Faustino *et al.* (2005), investigaram a viabilidade do lodo de esgoto como parte do substrato para cultivar mudas de *Senna siamea* (Lam.) H.S. Irwin & Barneby. Os pesquisadores concluíram que a incorporação do lodo de esgoto nos substratos para o crescimento de mudas pode ser uma alternativa eficaz para sua disposição final. Além disso, essa abordagem representa uma ferramenta que as prefeituras podem utilizar na produção de mudas para projetos de arborização urbana e na restauração de áreas degradadas.

A possível presença de poluentes no lodo (biossólido) como compostos orgânicos, patógenos e até mesmo metais pesados são fatores que podem provocar impactos ambientais negativos ao meio e, quando for o caso, nos alimentos produzidos. Desta forma, uma vez incorporados, podem ser acumulados no solo e águas ou até mesmo entrar na cadeia alimentar dos organismos vivos ali presentes (Alvarenga *et al.*, 2015). Desta forma, para constatar a capacidade de uso e possíveis limitações do resíduo em solo, deve ser precedido com análises da composição química do biossólido e do solo, pois quando aplicados em taxas inadequadas, podem ocasionar desbalanço dos nutrientes (Albuquerque *et al.*, 2002).

A aplicação dessa técnica na silvicultura ajuda a reduzir alguns desses riscos, uma vez que os produtos desse setor geralmente não são destinados à produção de alimentos (Bertolazi *et al.*, 2017). Outra grande vantagem que favorece a aplicação do biossólido em plantios florestais em relação à grande parte das culturas agrícolas são as aplicações espaçadas em longos períodos (POGGIANI *et al.*, 2000). No Brasil, o eucalipto é cultivado extensivamente, ocupando uma área de mais de 5 milhões de hectares e desempenhando um papel significativo na economia do país (IBA, 2016). Em termos gerais, o eucalipto tem um crescimento rápido e demonstra

adaptabilidade às variações de fertilidade do solo, como destacado em estudos realizados por Mendes *et al.* (2013) e Dias *et al.* (2015).

Quando aplicado adequadamente, o lodo de esgoto traz benefícios ao solo, pois não apenas adiciona matéria orgânica, mas também libera nutrientes de maneira gradual e constante. Esse método de liberação é particularmente vantajoso em cultivos de ciclo longo, como o eucalipto (IBRAHIM, 2019).

A aplicação do resíduo também possui mais de uma finalidade, seja ela para culturas que se destinam à alimentação humana/animal, finalidade florestal ou manutenção dos ecossistemas, pois o biossólido pode oferecer potencial agrônômico ou realizar o ajuste de pH do solo (SEVERINO *et al.*, 2006; BASU *et al.*, 2009).

3.6 Importância da Valorização de Resíduos Industriais

A valorização de resíduos industriais é um componente crucial na busca por práticas mais ecológicas e economicamente viáveis nas indústrias modernas. Dentro desse contexto, a utilização do lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria têxtil e cinza de caldeira como biossólidos tem despertado um interesse significativo. Esses subprodutos, que anteriormente eram considerados simplesmente resíduos a serem descartados, estão sendo reconhecidos pelo seu potencial como recursos valiosos em processos de economia circular (MARTINS *et al.*, 2022; MADEIRO *et al.*, 2022; BORSZOWSKI & ANHAIA, 2020).

O lodo de ETE da indústria têxtil, gerado no tratamento das águas residuais, é rico em nutrientes e matéria orgânica. Por outro lado, a cinza de caldeira, resultante da queima de biomassa, contém uma variedade de minerais e compostos químicos. Ambos os materiais têm sido tradicionalmente encaminhados para aterros sanitários, representando não apenas um desperdício de recursos, mas também um potencial risco ambiental (HARALDSEN *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2012; NORSTROM *et al.*, 2012; SANTOS, 2023).

Ao converter esses resíduos em biossólidos, abre-se a oportunidade de empregar esses materiais de forma benéfica. Os biossólidos podem ser utilizados em diversas aplicações, tais como adubação agrícola e recuperação de solos degradados, até mesmo como fonte de energia renovável. Além disso, a utilização de biossólidos reduz a demanda por fertilizantes químicos e contribui para a

diminuição da emissão de gases de efeito estufa associados à produção desses insumos e a não disposição em aterros, evitando a decomposição anaeróbica (SILVA, 2014).

De igual modo, a valorização desses resíduos tem um impacto positivo significativo no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente no ODS 12 (Consumo e produção responsáveis).

Ao adotar práticas que visam a prevenção, redução, reciclagem e reuso de resíduos, contribuimos para a redução da geração de resíduos industriais, promovendo assim um consumo e produção mais responsáveis e sustentáveis. Também, a valorização desses resíduos está alinhada ao ODS 15, uma vez que fomenta o manejo florestal sustentável, incluindo a conservação e o reflorestamento, fortalecendo os esforços para preservar a biodiversidade e os ecossistemas terrestres (ONU, 2015).

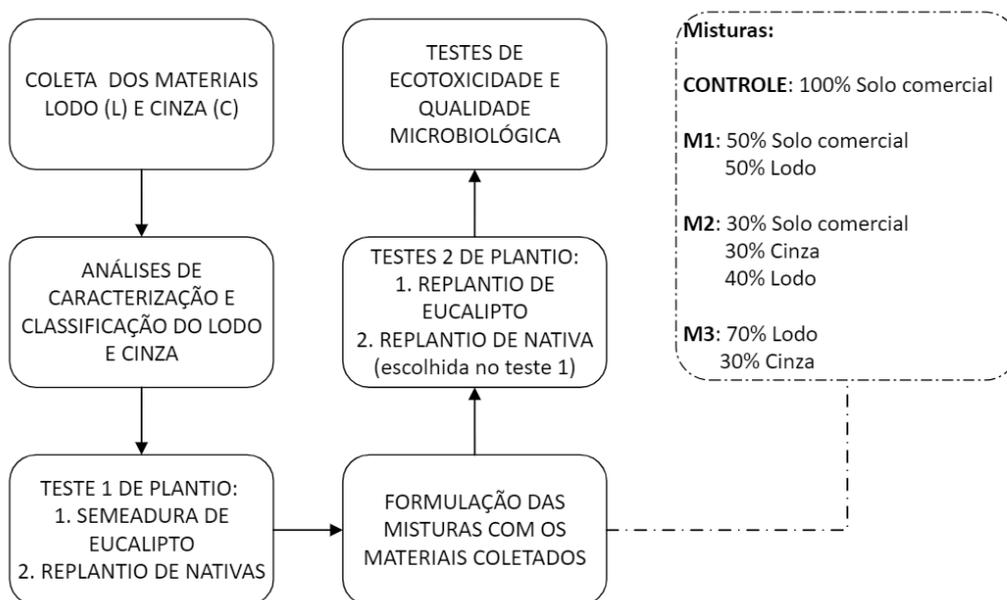
4. METODOLOGIA

No presente estudo, foram empregadas como matérias-primas o lodo têxtil (LT) oriundo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma indústria têxtil localizada no município de Joinville, Santa Catarina, a cinza resultante da queima de cavacos/serragem de pinus em caldeiras de biomassa da mesma empresa, e um solo comercial (substrato adubado).

As matérias-primas foram caracterizadas/analizadas, testadas em diferentes concentrações para avaliar o potencial fertilizante dos resíduos no cultivo de mudas de *Eucalyptus grandis* (eucalipto) e nativas da Mata Atlântica variadas e conduzidas para ensaios de ecotoxicidade.

A fim de facilitar a compreensão da metodologia empregada neste trabalho, a Figura 2 apresenta um fluxograma simplificado, enquanto nas seções seguintes são fornecidos os detalhes de cada etapa.

Figura 2: Fluxograma simplificado da metodologia adotada.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

4.1 Coleta e Preparação do Lodo Têxtil

O lodo têxtil (LT), resíduo sólido abordado neste estudo, foi originado no processo de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, que utiliza um sistema de lodos ativados, seguido por um processo de tratamento físico-químico (sulfato de alumínio, descolorante e polímero), operando em regime de batelada.

Neste sentido, com o objetivo de assegurar a consistência dos testes conduzidos neste estudo, uma quantidade significativa de lodo foi coletada e reservada para todas as análises e testes. Foi coletada uma quantidade aproximada de 100 kg de lodo (em sua fase úmida) diretamente da caçamba estacionária onde ocorre a descarga do filtro prensa. Essa coleta seguiu as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 10007/04, com uma subdivisão superficial em uma rede quadriculada imaginária para a coleta em quatro pontos distintos do resíduo na caçamba. Com auxílio de uma pá, em cada quadro, foram retiradas amostras de maneira que as variações do perfil fossem representativas.

O lodo foi acondicionado em recipiente de plástico com capacidade para 200 litros, equipado com uma tampa removível, durante aproximadamente 24 horas, para a aferição da umidade em laboratório.

A análise da umidade foi conduzida conforme as diretrizes da norma NBR 6457 (ABNT, 2016). Para isso, uma amostra de 200 g foi pesada em um cadinho e submetida a uma estufa com circulação forçada a 100 - 105°C por um período de 24 horas.

4.2 Coleta e Preparação da Cinza de Caldeira

A cinza foi coletada diretamente da caçamba estacionária onde ocorre a descarga automática da caldeira por meio de um sistema de esteira.

A cinza gerada na caldeira foi proveniente da queima de uma mistura de cavacos de pinus, os quais podem ser provenientes tanto de madeira de pós consumo, como no caso de madeiras de paletes, quanto de madeira virgem triturada. Por conter cavacos de pinus provenientes de pós-consumo, é comum a existência de pregos e grampos que não foram removidos pela esteira imantada. Portanto, presumiu-se que a cinza poderia apresentar características químicas distintas a cada carga gerada, devido à possível oxidação dos pregos e grampos. Para garantir a consistência dos testes e análises, as cinzas utilizadas foram coletadas uma única vez, em uma quantidade previamente calculada (aproximadamente 40 kg) para realizar todos os testes necessários.

Para isso, as diretrizes estabelecidas pela NBR 10007 (ABNT, 2004) foram seguidas ao coletar o resíduo de cinza da caçamba estacionária, utilizando o método da divisão superficial de uma rede quadriculada imaginária para a coleta em quatro pontos distintos da caçamba. Um amostrador do tipo pá de jardinagem foi utilizado para realizar a coleta, e as amostras coletadas foram cuidadosamente homogeneizadas para obter uma amostra composta representativa.

Posteriormente, a amostra foi disposta em um recipiente plástico com capacidade de 200 litros, equipado com uma tampa removível, para garantir a segurança e preservação adequada do material coletado.

Uma porção do resíduo foi reservada para análise a fim de determinar sua umidade, devido ao fato deste material estar exposto em uma área sem cobertura. Esta análise foi realizada como parte do processo de preparação das misturas destinadas aos testes, seguindo as orientações estabelecidas pela norma NBR 6457 (ABNT, 2016).

4.3 Obtenção e Preparo do Solo

O solo empregado na pesquisa foi adquirido em um estabelecimento comercial (casa de jardinagem).

Para integrá-lo aos outros resíduos, a medição da umidade também foi realizada em laboratório, respeitando os procedimentos da NBR 6457 (ABNT, 2016).

4.4 Classificação e Caracterização Físico-química do Lodo Têxtil e Cinza de Caldeira

Os resíduos lodo e cinza, foram enviados a laboratório terceirizado para a realização dos ensaios de caracterização e classificação. Essas análises envolveram a realização de testes físico-químicos nas massas brutas dos resíduos, bem como testes nas soluções lixiviadas e solubilizadas.

As análises seguiram os preceitos da ABNT, conforme a coletânea NBR 10.004 - Classificação de resíduos, NBR 10.005 - Ensaio de lixiviação e NBR 10.006 - Ensaio de solubilização, a fim de obter conhecimento sobre a classificação do resíduo em Classe I (perigosos), Classe IIA (não perigoso, não inertes) ou Classe IIB (não perigoso, inertes), de acordo com os parâmetros e limites estabelecidos no Anexo F e G da NBR 10.004 (ABNT, 2004).

Além dos parâmetros exigidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), foram realizadas análises complementares, de outras substâncias que estão listadas na Resolução CONAMA 498/20 (arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre chumbo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco) a fim de investigar a possibilidade de incorporação dos materiais em solo e conhecer seu potencial agrônomo.

O laboratório onde as análises foram realizadas possui certificação de conformidade com a ISO 17025/17 e é aprovado pelo órgão licenciador do estado de Santa Catarina, que atesta a precisão das análises e a constante calibração dos equipamentos.

4.5 Teste 1 de Plantio

Foram conduzidos uma série de ensaios de plantio, abrangendo os estágios de semeadura inicial e plantio, com o propósito de determinar a abordagem mais

eficaz a ser empregada no âmbito deste estudo. É importante mencionar que os testes abrangeram exemplares exóticos e nativos da Mata Atlântica.

4.5.1 Teste de Germinação de Eucalipto e Plantio de Espécies Nativas

Os testes iniciais de germinação de eucaliptos (*Eucalyptus grandis*) e o plantio de espécies nativas foram conduzidos de forma simultânea, em colaboração com o viveiro Mudas do Vale, localizado em Timbó/SC. Portanto, é importante salientar que esses experimentos foram realizados em condições de viveiro, replicando o ambiente real de plantio. As sementes de Eucalipto utilizadas neste teste possuem certificado de origem e procedência e foram adquiridas no Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) da Universidade de São Paulo (USP).

No teste de germinação de *Eucalyptus grandis*, foram semeadas um total de 140 sementes em diferentes concentrações de lodo, especificamente 50% e 100% (Figura 3), além de um grupo de controle que utilizou substrato comercial. Dessa forma, o teste englobou um conjunto de 420 sementes avaliadas para determinar o efeito das diferentes concentrações de lodo no processo de germinação.

Figura 3: Placa semeada na condição 100% lodo têxtil (esquerda) e placas com mudas nativas (direita).



Fonte: elaborado pela autora (2023).

Para as espécies nativas, foi realizado o plantio de dois indivíduos em cada uma das concentrações testadas, ou seja, 50% e 100% de lodo, juntamente com o plantio no grupo de controle, utilizando substrato comercial como referência. Este

conjunto de experimentos envolveu a avaliação de 19 espécies nativas da Mata Atlântica (MA), apresentadas na Tabela 2.

Logo, o experimento submeteu 114 indivíduos (Figura 3), permitindo a análise dos efeitos das diferentes concentrações de lodo no processo de plantio e desenvolvimento dessas espécies. Para avaliar o desempenho das mudas, foi aferido a altura (H) e o diâmetro (D) no início e ao final do experimento.

Ambos os experimentos (germinação de eucalipto e plantio de nativas) se estenderam por 60 dias.

Tabela 2: Espécies nativas (MA) utilizadas no teste de plantio.

Nomes Populares	Nomes Científicos	Família
Araçá Amarelo	<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	Myrtaceae
Araçá do Mato	<i>Psidium acutangulum</i> DC.	Myrtaceae
Araçá Pera	<i>Psidium acidium</i> (DC.) Landrum	Myrtaceae
Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	Araucariaceae
Capororoca	<i>Myrsine guianensis</i> (Aubl.) Kuntze	Primulaceae
Cedro Rosa	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae
Cerejinha do Rio Grande	<i>Eugenia involucrata</i> DC.	Myrtaceae
Chal Chal	<i>Allophylus edulis</i> (A.St.-Hil. Et al.) Hieron. Ex Niederl.	Sapindaceae
Cortiça Lisa	<i>Annona glabra</i> L.	Annonaceae
Grandiúva	<i>Trema micranta</i> (L.) Blume	Cannabaceae
Grumixama	<i>Eugenia brasiliensis</i> Lam.	Myrtaceae
Ingá Banana	<i>Inga uruguensis</i> Hook. & Arn.	Fabaceae
Ingá Feijão	<i>Inga marginata</i> Willd.	Fabaceae
Ipê Amarelo	<i>Handroanthus albus</i> (Cham.) Mattos	Bignoniaceae
Manacá da Serra	<i>Pleroma mutabile</i> (Vell.) Triana	Melastomataceae
Olandi	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	Calophyllaceae
Pitanga	<i>Eugenia uniflora</i> L.	Myrtaceae
Tanheiro	<i>Alchornea triplinervia</i> (Spreng.) Müll.Arg.	Euphorbiaceae
Uvaia	<i>Eugenia pyriformis</i> Cambess.	Myrtaceae

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.6 Preparo das Misturas de Lodo, Cinza e Solo

Os materiais lodo têxtil, cinza de caldeira e o solo comercial coletados, foram combinados em proporções específicas para a formulação das amostras destinadas ao teste de plantio de *Eucalyptus grandis*. e *Pleroma mutabile* e as análises de ecotoxicidade.

Dessa maneira, foram preparadas três composições de lodo, cinza e solo comercial, além do controle contendo apenas o solo comercial como substrato. Cada uma com um total de 30 kg, conforme a Figura 4.

Figura 4: Esquema da formulação dos substratos (% m/m).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As misturas foram preparadas em bandejas plásticas, e a homogeneização realizada utilizando uma pá de jardinagem. Para pesar o material, foi utilizado uma balança de piso modelo 2180, fabricada pela Toledo do Brasil, com o número de série 2080003633. Essa balança tem uma capacidade de 1000 kg e uma resolução de 0,2 kg.

Após a preparação de cada uma das misturas, uma porção do material foi empregada no teste 2 de plantio (descrito na seção 4.7), enquanto o restante foi alocado para os testes de ecotoxicidade (conforme detalhado na seção 4.8) e o teste de qualidade microbiológica (abordado na seção 4.9).

4.7 Teste 2 de Plantio

Foram realizados testes de plantio de *Eucalyptus grandis* e de uma espécie nativa escolhida no Teste 1 (*Pleroma mutabile*), utilizando as formulações descritas na seção 4.6. O critério de seleção da espécie nativa foi o desempenho superior em relação a densidade aparente obtido durante os experimentos.

4.7.1 Teste de Plantio de *Eucalyptus grandis* e Plantio de espécie nativa

O teste de plantio de *Eucalyptus grandis* (eucalipto) e da espécie nativa escolhida, *Pteroma mutabile*, foi conduzido nas instalações da universidade, e este experimento foi realizado de forma simultânea para as duas espécies testadas. Para a realização do teste, foram selecionados 40 indivíduos de cada espécie, os quais foram distribuídos nas três condições experimentais previamente definidas na seção 4.6 (Figura 6), além do controle. Todas as mudas foram medidas em Altura (H) e Diâmetro (DC).

É importante ressaltar que as mudas adquiridas para este experimento, possuem a mesma idade fisiológica, aproximadamente 120 dias após semeadura. As sementes que originaram as mudas de eucalipto possuem certificado de origem e procedência e foram adquiridas no Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) da Universidade de São Paulo (USP). O teste seguiu estático por 60 dias, apenas com controle de rega a cada 2 dias.

Após o término do teste, foram realizadas as seguintes medições nos indivíduos: Altura (H) em centímetros, Diâmetro de Coleto (DC) em milímetros, Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (PMSPA), Peso de Matéria Seca das Raízes (PMSR) e o Peso da Massa Seca Total (PMST) em gramas. O diâmetro de coletor foi obtido por meio de paquímetro digital, enquanto a altura foi mensurada utilizando régua milimetrada, tomando como referência a gema terminal (meristema apical), metodologia utilizada por Gomes (2002). A quantificação da massa seca da parte aérea e do sistema radicular foi realizada através da secagem de ambas as partes em estufa de circulação forçada de ar, a 70°C, por um período de aproximadamente 72 horas, seguida pela pesagem das partes vegetais. Com os dados acima coletados, o Aumento (ganho) de Altura (AH) foi aferido e o Índice de Qualidade Dickson (IQD) e o Índice de Robustez (IR) serão calculados, por meio das fórmulas de Dickson *et al.* (1960), apresentadas a seguir:

$$IQD = \frac{PMST (g)}{H (mm) / DC (mm) + PMSPA (g) / PMSR (g)} \quad (\text{Eq. 01})$$

$$IR = \frac{H(mm)}{DC (mm)} \quad (\text{Eq. 02})$$

As características analisadas foram então submetidas à análise estatística.

4.8 Teste de Ecotoxicidade nas Misturas e no Extrato Solubilizado

Biotestes foram executados a fim de avaliar o comportamento dos organismos terrestres e aquáticos em diferentes níveis tróficos em contato com a formulação realizada para o plantio. Foram utilizados os organismos *Daphnia magna* Straus, 1820 (pulga d'água) para a condição aquática e sementes de *Eruca sativa* (Mill.) Thell.(rúcula) para o meio terrestre.

4.8.1 Obtenção do Extrato Solubilizado das Condições Testadas

O preparo do extrato solubilizado seguiu os procedimentos descritos na NBR 10.006/2004. Para isso, as amostras foram previamente secas a temperatura de até 42°C, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar e exaustão, para determinar a percentagem de umidade.

Após, foi pesado aproximadamente 250 g (base seca) de cada condição a ser testada (4 condições mais o controle - Figura 6) em um frasco Becker de 1000 mL e água destilada será adicionada até atingir 1000 mL. Em seguida, a mistura foi agitada manualmente em velocidade baixa por cinco minutos. O recipiente da amostra foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por sete dias, em temperatura ambiente.

A solução em repouso passou por um processo de filtração utilizando um dispositivo de filtração equipado com uma membrana filtrante de porosidade de 0,45 µm. O líquido a ser filtrado foi armazenado em recipientes de plástico.

Para realizar a caracterização do extrato solubilizado, foram medidos o pH, a salinidade, a temperatura, a condutividade e o oxigênio dissolvido utilizando uma sonda multiparamétrica da marca Hanna Instrumentos, modelo HI 9828.

Em seguida, a fim de preservar as amostras, elas foram devidamente refrigeradas de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma NBR 15.469/2015.

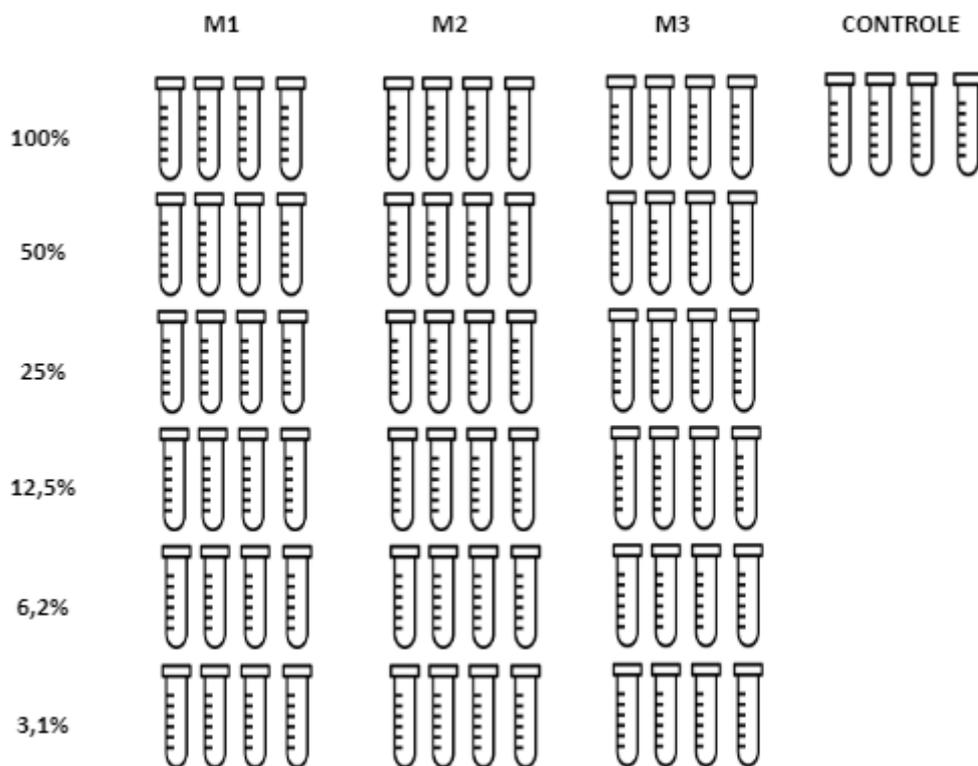
4.8.1.1 Teste de Ecotoxicidade Aguda com *Daphnia magna*

O teste de toxicidade aguda com *Daphnia magna* foi conduzido utilizando o extrato solubilizado, preliminarmente preparado conforme ABNT 10006/2004. Para

conduzir o teste, foi realizado a aferição do pH, que foi corrigido por meio da adição ácido clorídrico (HCl).

Este teste seguiu a metodologia da NBR 12.713/22, a qual envolveu a exposição dos indivíduos jovens à solução do extrato solubilizado, juntamente com uma solução controle (água do cultivo dos organismos), ao longo de um período de 48 horas. Para cada mistura analisada, foram realizadas 6 concentrações (100, 50, 25, 12,5, 6,2 e 3,1%) em quadruplicata, conforme Figura 5.

Figura 5: Representação esquemática do teste de ecotoxicidade em meio aquoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Em cada tubo, foram adicionados 10 mL de solução teste e cinco filhotes de *Daphnia magna* com idade entre 6 e 24 horas, totalizando 80 organismos por diluição.

Posteriormente, os tubos foram tampados e mantidos em condições controladas de temperatura a 20 °C +/- 2 °C, com um fotoperíodo de 16 horas de luz seguidas por 8 horas de escuridão. Após um período de 48 horas, foi realizada a avaliação da imobilidade e/ou letalidade dos indivíduos.

Para validar o teste, foram considerados imóveis não apenas os organismos aparentemente mortos, mas também aqueles incapazes de nadar na coluna d'água até 15 segundos após uma leve agitação do recipiente, bem como aqueles que estiverem flutuando na superfície, mesmo que apresentassem algum tipo de movimento.

Os ensaios foram realizados no laboratório de Meio Ambiente da Univille.

4.8.1.2 Teste de Ecotoxicidade Crônica com *Daphnia magna*

O ensaio crônico de bioensaio com o microcrustáceo *Daphnia magna* seguiu as diretrizes da ISO 10706 (2000). O método implica na exposição dos indivíduos a amostras puras de água e solubilizados das misturas realizadas (Controle (solo), M1, M2 e M3) ao longo de um período de 21 dias.

Para conduzir o ensaio crônico, foram empregados 10 recipientes de 25 ml cada para o grupo de controle (validação do teste), além de 10 recipientes de 25 ml para cada amostra estudada (Controle (solo), M1, M2 e M3). Cada frasco recebeu um organismo teste com idade entre 2 e 26 horas.

Os organismos foram alimentados diariamente com a alga unicelular *Desmodesmus subspicatus* durante a primeira semana do ensaio, seguindo a mesma metodologia de alimentação do cultivo. Nas duas semanas seguintes, a alimentação ocorreu a cada dois dias, coincidindo com a renovação do meio.

Durante os 21 dias do ensaio, os organismos foram mantidos em uma câmara incubadora, com um fotoperíodo de 16 horas de luz e 8 horas de escuridão, a uma temperatura de 20 ± 2 °C. As observações foram realizadas no 7º dia e, posteriormente, duas vezes por semana, simultaneamente à renovação do meio.

Para a avaliação das amostras, dois parâmetros foram analisados na execução do teste: longevidade e fecundidade. A sobrevivência foi quantificada como o número de progenitoras sobreviventes ao final dos 21 dias do ensaio. A fecundidade foi avaliada pela contagem de neonatos gerados pelas fêmeas ao longo do período de 21 dias. O parâmetro utilizado foi a média de jovens gerados por fêmea, considerando o número de posturas ao longo do teste, conforme calculado pela equação a seguir:

$$Média = \frac{n^{\circ} \text{ total de jovens}}{n^{\circ} \text{ de mães} * n^{\circ} \text{ de posturas}} \quad (\text{Eq. 03})$$

Para calcular a média, foi excluído o número de filhotes produzidos em casos em que houve a morte de adultas, não considerando a progenitora em questão. No entanto, essa subtração foi aplicada somente quando a fêmea falece antes do 18º dia do teste, uma vez que, após esse período, a reprodução torna-se altamente variável, e a ausência de filhotes neste intervalo não impacta nos dados coletados (BRENTANO, 2006).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Meio Ambiente da Univille.

4.8.1.3 Teste de Ecotoxicidade com sementes de *Eruca sativa*

O teste de toxicidade com rúcula (*Eruca sativa*) foi conduzido utilizando sementes da espécie com pureza de 99,9% da marca Isla.

O experimento consistiu em dispor as sementes de rúcula em incubação, em contato com os extratos solubilizados das misturas Controle, M1, M2 e M3 (previamente preparados conforme descrito na seção 4.8.1), para avaliar os parâmetros de crescimento macroscópico por meio da medição do comprimento das radículas.

Para o ensaio, foram utilizadas placas de Petri de vidro (90mm de diâmetro) devidamente desinfetadas com ácido clorídrico (HCl) 10% v/v, cobertas com papel filtro de gramatura 80 g m⁻² com o mesmo diâmetro da placa. Em cada placa foram adicionadas 3 mL da solução a ser testada e 10 sementes foram posicionadas com um espaçamento apropriado entre elas (Figura 6).

Figura 6: Montagem do teste com *Eruca sativa*.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Foram preparadas 5 réplicas para cada solução, além do controle, que foi executado com água destilada (BELO, 2011). As placas, devidamente identificadas e

vedadas, foram alocadas em incubadora por 7 dias a uma temperatura de 20°C +/- 2°C, com um fotoperíodo de 16 horas de luz e 8 horas de escuridão, como indicado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, no documento intitulado “RAS” – Regras para Análise de Sementes.

Os testes e os cálculos de germinação de sementes e alongamento de raiz seguiram os procedimentos descritos nas normas para análise de sementes (Brasil, 2009), bem como nos estudos de Correia (2015) e Costa (2010), por meio da avaliação da germinação das plantas.

O percentual de germinação (%G), o alongamento da raiz (%R) e o índice de germinação (IG) foram determinados utilizando as Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$(\%G) = \frac{N^{\circ} \text{ total de sementes germinadas na amostra}}{N^{\circ} \text{ de sementes germinadas no controle}} * 100 \quad (\text{Eq. 04})$$

$$(\%R) = \frac{\text{Média do alongamento da raiz nas sementes germinadas na amostra}}{\text{Média do alongamento da raiz nas sementes do controle}} * 100 \quad (\text{Eq. 05})$$

$$(IG) = \frac{(\%G)*(\%R)}{100} \quad \text{Eq (06)}$$

4.9 Qualidade Microbiológica Lodo, Cinza, Solo e Misturas

A fim de realizar a avaliação microbiológica do lodo, cinza, solo (controle) e das misturas (M1, M2 e M3), foram conduzidas análises dos coliformes totais e coliformes termotolerantes. Para quantificação dessas bactérias foi utilizado o método Colilert IDEXX Quanti-Tray®/2000. O Colilert utiliza nutrientes (açúcares ligados a radicais orgânicos cromogênicos) que fazem com que os microrganismos de interesse presentes na amostra produzam uma mudança de cor (ou fluorescência) no sistema inoculado (MANAFI, 2000).

Para isso, os extratos solubilizados de cada material analisado foram preparados de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 10006 (ABNT, 2014). Em seguida, cada extrato solubilizado foi adicionado à tabela Quanti-Tray, que foi vedada e colocada em uma estufa a 37°C por 24 horas. Ao término do teste, as cavidades que apresentavam coloração tão amarela quanto o comparador, ou

mais, foram contabilizadas (sob luz normal e UV), e a tabela de Número Mais Provável (NMP) foi consultada.

Para validar as informações do teste, foi preparada uma amostra controle contendo água tratada fornecida pela companhia de abastecimento de água do município.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

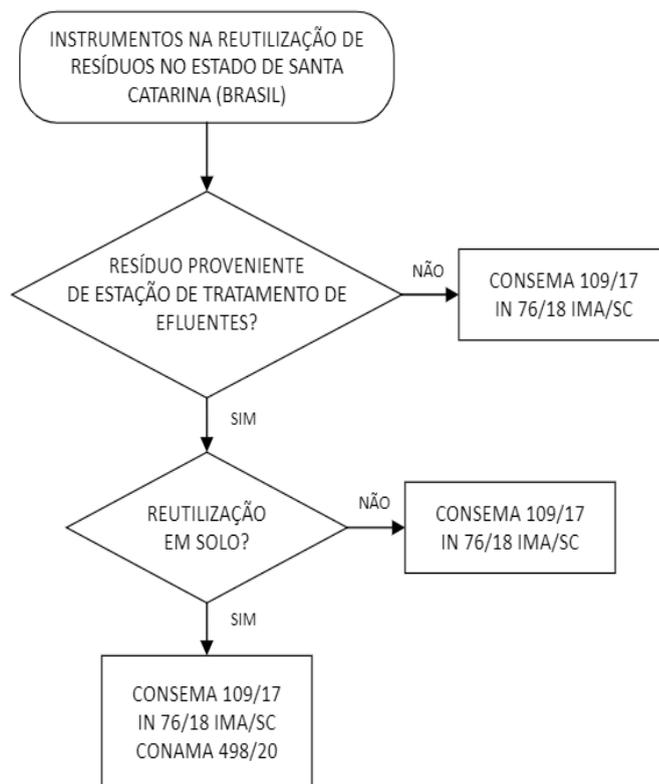
5.1 Classificação dos Resíduos

A classificação dos resíduos destinados à reutilização, seja para fins agrícolas, florestais, processos industriais ou construção, é essencial para obter informações detalhadas sobre o próprio resíduo.

Os requisitos legais relacionados à reutilização destes materiais podem oscilar conforme sua procedência, o local de origem e o propósito da reutilização. No âmbito deste estudo específico, um dos resíduos estudados é proveniente de ETE (lodo têxtil) e o outro resultante da queima da biomassa de pinus (cinza de caldeira), ambos são gerados no estado de Santa Catarina, Brasil, e se destinam a serem aplicados no solo. Logo, os instrumentos legais aplicáveis para essa situação podem ser consultados na Figura 7.

De acordo com o fluxograma apresentado (Figura 7), a reutilização do lodo proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes da indústria requer a aderência às diretrizes estabelecidas tanto a nível federal quanto estadual. Por outro lado, no caso da reutilização da cinza, apenas as diretrizes estaduais são aplicáveis. Portanto, conforme resolução CONAMA 498/20, podemos afirmar que, para possibilitar a reutilização dos lodos, eles devem ser isentos de características perigosas, o que não é uma exigência para os resíduos de cinza, uma vez que a resolução CONSEMA 109/17 permite a reutilização de materiais classificados como perigosos.

Figura 7: Fluxograma dos instrumentos legais aplicáveis para a reutilização de resíduos em Santa Catarina, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Diante o exposto, torna-se necessário proceder à classificação individual de cada tipo de resíduo. Os resultados são apresentados nas seções subsequentes, acompanhados de suas respectivas considerações.

5.1.1 Classificação do Lodo Têxtil e da Cinza de Caldeira

Após a condução das análises conforme os critérios da NBR 10.004 (ABNT, 2004), foi constatado que o lodo têxtil não ultrapassou os limites estabelecidos em cada avaliação realizada (extrato lixiviado, extrato solubilizado e massa bruta) (Anexo). Dessa forma, sua classificação foi determinada como Classe IIB, indicando sua não periculosidade e caráter inerte.

Em contrapartida, o resíduo cinza de caldeira, sujeito à mesma avaliação, excedeu o valor estipulado para o parâmetro sulfato, conforme especificado no Anexo G da referida norma, durante a análise do extrato solubilizado (Anexo). Como

resultado, a classificação atribuída a esse resíduo foi a de Classe IIA, indicando sua não periculosidade, porém, sua natureza não inerte.

Conforme as regulamentações anteriormente mencionadas e com base na classificação de periculosidade, ambos os resíduos são passíveis à incorporação no solo. Para avaliar as demais especificações realizadas nos dispositivos legais CONSEMA 109/17 e CONAMA 498/20 (Brasil, 2020), avançou-se na realização das demais caracterizações.

5.2 Caracterização Substâncias Químicas e pH do Lodo e Cinza

Os resultados das análises de caracterização das substâncias químicas, para os dois resíduos em estudo, conforme as especificações da CONAMA 498/20 estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Análise das substâncias químicas e pH do lodo têxtil e da cinza de caldeira e valor máximo permitido no biossólido segunda o Conama 498/20.

Substâncias químicas (mg/kg ST) e pH			
Parâmetros	Lodo	Cinza	CONAMA 498/20 Classe 1
Arsênio	3,62	< 1	41
Bário	41,23	78,82	1300
Cádmio	< 0,05	< 0,05	39
Cromo	9,64	90,29	300
Cobre	73,57	124,72	1500
Chumbo	< 1	70,48	1000
Mercúrio	0,03	< 0,02	17
Molibdênio	4,21	4,86	50
Níquel	11,67	59,17	420
Selênio	< 1	< 1	36
Zinco	140,94	707,31	2800
pH	9,82	10,67	> 12

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

É importante destacar que a obrigação pela análise das substâncias químicas é exclusiva para o lodo, conforme estipulado pela Resolução Federal que aborda especificamente a aplicação de lodos em solo. No entanto, dado que o material cinza foi incorporado ao lodo e submetido aos testes de plantio, foram realizadas análises semelhantes para os dois resíduos, com o objetivo de aprimorar a abrangência da pesquisa.

De acordo com os dados apresentados (Tabela 3), as concentrações das substâncias químicas tanto para o lodo têxtil quanto para a cinza de caldeira estão abaixo dos limites máximos estabelecidos pela regulamentação CONAMA 498/20 (Brasil, 2020), para a classe 1, condição mais restritiva.

Os resultados das substâncias analisadas para o lodo também estão em conformidade com as descobertas previamente documentadas na literatura, que descrevem os tipos de compostos inorgânicos e suas concentrações frequentemente encontradas (LEME *et al.*, 2009; MARTINS *et al.*, 2016; SANTOS, 2023).

A CONAMA 498/20 (Brasil, 2020) também exige a implementação de técnicas para diminuir a atração de vetores no lodo para a utilização no solo. A resolução menciona várias técnicas que podem ser aplicadas com esse propósito, como compostagem, secagem, estabilização química, entre outros. No caso específico do lodo produzido pela Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da indústria têxtil, já é empregado um processo de estabilização química que inclui a adição de cal hidratada. Para este método de redução da atratividade de vetores, a adição do álcali ao lodo deve elevar o pH para pelo menos 12 por um período de 2 horas, mantendo-o acima de 11,5 por mais 22 horas. Entretanto, ao medir o pH da amostra de lodo coletada para os testes, foi registrado um pH de 9,82. Isso indica que, neste caso, seria necessário adicionar uma quantidade maior de álcali para elevar o pH do lodo ou adotar outro método para garantir a redução da atratividade de vetores, como secagem por exemplo.

De acordo com a CONSEMA 109/17, não é necessário aplicar tratamentos adicionais nas cinzas, o que significa que não é preciso reduzir sua atratividade para vetores nem aferir seu pH. Porém, o pH das cinzas utilizadas neste estudo foi medido para entender sua alcalinidade, já que o lodo e as cinzas serão combinados para formar as misturas examinadas neste estudo.

Ainda conforme demonstrado na Tabela 3, o pH da cinza analisada é maior do que o do lodo examinado. Esse resultado está de acordo com as informações fornecidas por Borma (2003), que indicam que as cinzas produzidas no Brasil são naturalmente alcalinas. Isso sugere que ao combinar esses materiais, há a possibilidade de economizar na adição de álcali nas misturas resultantes, caso a intenção seja reduzir a atratividade de vetores pelo método da elevação do pH.

Em contrapartida, um estudo conduzido por Paiva (2015), foram utilizados resíduos alcalinos para higienização de lodos, neste caso explorou-se a utilização de dregs e grits (resíduos da indústria de polpa celulósica) para a higienização de lodo de esgoto sanitário. O estudo demonstrou que a utilização desses resíduos foi eficiente para a eliminação de *E. coli*, atingindo em 5 dias, valores menores que 10^3 NMP/g de ST, que também é outra premissa exigida pela CONAMA 498/20 como critério para qualidade microbiológica.

5.3 Teste 1 de Plantio

Ao submeter as sementes de *Eucalyptus grandis* à placa contendo 100% de lodo, foi evidenciada uma completa inibição da germinação ao longo dos 60 dias de teste. Em contrapartida, na placa com 50% de lodo, registou-se a germinação de 39% dos indivíduos. Entretanto, pode-se notar na Figura 8, que em comparação com a placa padrão (sem lodo), a germinação ocorreu em poucos dias após a aplicação das sementes no substrato comercial. Em outras palavras, apesar da presença de lodo, as sementes conseguiram germinar, porém, a taxa de germinação foi inferior à metade dos indivíduos submetidos, e o desenvolvimento também ocorreu de maneira mais tardia.

Figura 8: Acompanhamento da germinação do eucalipto 20 dias após preparo do teste. Placa contendo substrato comercial (esquerda); Placa contendo 50% de lodo (meio); Placa contendo 100% lodo (direita).



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Esses resultados sugerem que a presença de lodo pode ter influenciado negativamente a germinação das sementes de eucalipto, especialmente nas concentrações mais elevadas do resíduo. Portanto, optou-se por prosseguir com o teste de plantio 2, que consiste na inserção de mudas de eucalipto, em vez de sementes para germinação, em diferentes concentrações de resíduo.

No contexto do replantio de espécies nativas, entre as 19 espécies avaliadas nas concentrações de 50% e 100% de lodo, apenas o manacá-da-serra (*Pleroma mutabile*) (Figura 9) resistiu e se desenvolveu exposto ao resíduo, em comparação com as plantas da placa de controle (substrato comercial).

Considerando o desempenho positivo dessa espécie durante o teste, prosseguiu-se com os demais experimentos de plantio, considerando-a como uma candidata promissora para o replantio em condições com presença de resíduo.

Figura 9: Manacá-da-serra após 60 dias de teste.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

5.4 Teste 2 de Plantio

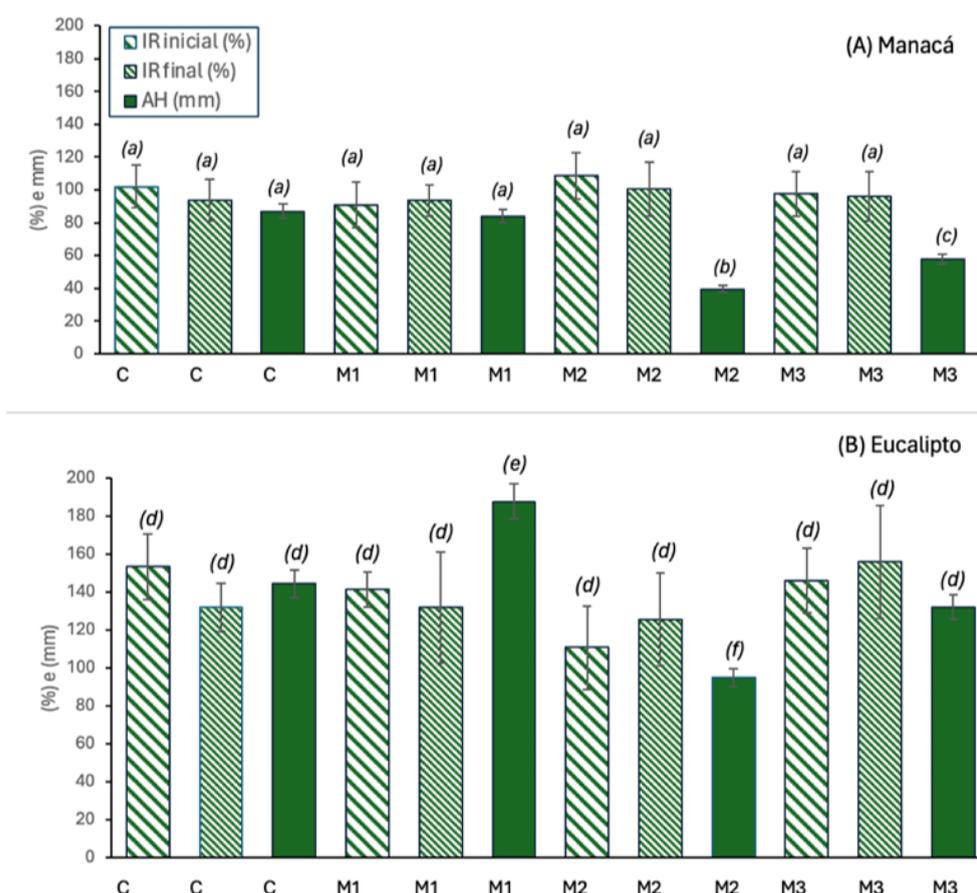
No segundo teste de plantio, foram analisados o crescimento e a qualidade das mudas de manacá-da-serra (*Pleroma mutabile*) e Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) sob diferentes condições de substrato, incluindo solo comercial (controle) e misturas

de lodo têxtil e cinza de caldeira (M1, M2 e M3). O teste seguiu estático por 68 dias, apenas com controle de rega.

Os parâmetros avaliados incluíram Altura (H) e Diâmetro de Coleta (DC), Peso da Matéria Seca da Parte Aérea (PMSPA), Peso da Matéria Seca Radicular (PMSR). Com estes dados o Índice de Robustez (IR), Aumento (ganho) de altura (AH) e Índice de Qualidade Dickson (IQD) foram calculados.

Na Figura 10, são apresentados os gráficos de IR (inicial e final) e AH para manacá-da-serra e Eucalipto, enquanto na Figura 11 são mostradas as fotos dos recipientes com as mudas dessas espécies nas fases inicial e final.

Figura 10: Comparação dos valores de Índice de Robustez (IR) inicial e final e Aumento (ganho) da altura (AH) entre as misturas C (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para Manacá (A) e Eucalipto (B). Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

A Figura 10 destaca a relação entre a altura e o diâmetro (IR) das mudas de Manacá e Eucalipto em diferentes tipos de solo, incluindo controle (C) e solos tratados com lodo e cinza (M1, M2, M3). Os resultados indicam que o lodo e a cinza não interferiram significativamente na relação IR para ambos os tipos de mudas.

A relação H/DC (índice de robustez) é uma medida do equilíbrio no desenvolvimento das mudas. Quanto menor o valor desse índice, melhor é a qualidade da muda, bem como sua capacidade de sobrevivência e estabelecimento após o plantio (CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2018). Dessa forma, os tratamentos aplicados não resultaram no estiolamento das mudas, evidenciando um desenvolvimento equilibrado.

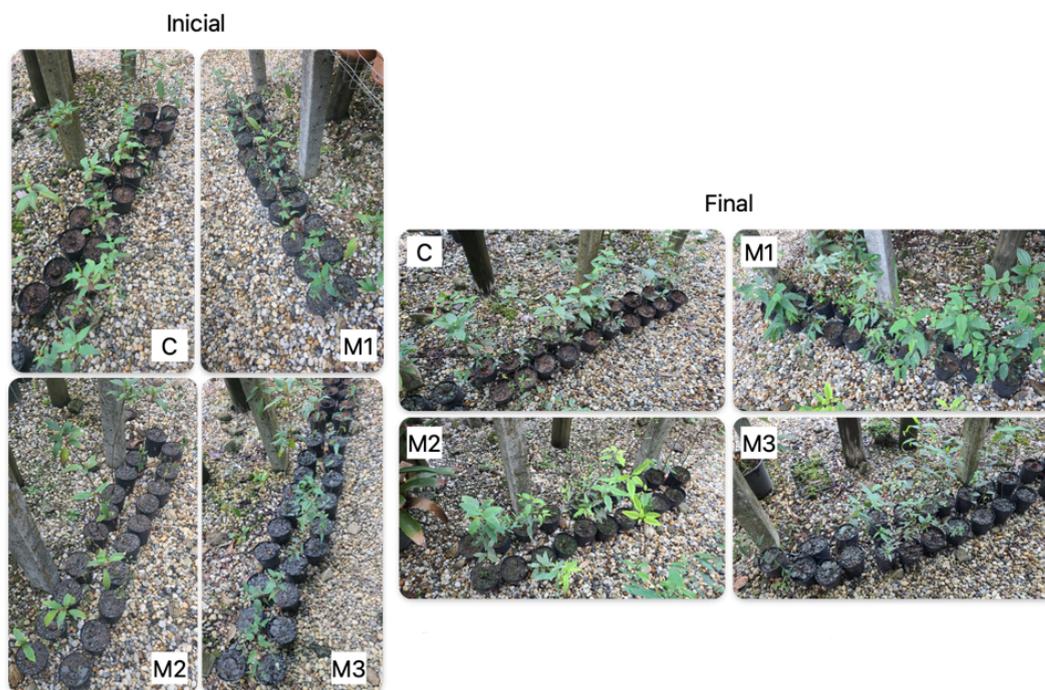
Com relação ao aumento da altura (AH) das mudas, observou-se que, para o Manacá, o tratamento M1 (50% lodo + 50% solo comercial) apresentou desempenho similar ao controle (100% solo comercial). Por outro lado, em M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza), o crescimento foi inferior ao controle, porém, não apresentando anormalidades em relação ao Índice de Robustez.

Para as mudas de Eucalipto, o tratamento M1 resultou em maior crescimento em altura do que o controle, enquanto M2 apresentou menor crescimento (também, não apresentando anormalidades em relação ao IR) e M3 manteve-se igual ao controle. Diante desses resultados, o Índice de Qualidade Dickson foi calculado especificamente para o tratamento M1 e controle.

Silva *et al.* (2018) e Azevedo *et al.* (2010) relatam que o IQD é um excelente indicador da qualidade de mudas, pois seu cálculo leva em conta a robustez (IR) e o equilíbrio da distribuição de biomassa na planta, ponderando os resultados de parâmetros importantes na avaliação da qualidade das mudas. No entanto, é importante destacar que a desvantagem desse método é seu caráter destrutivo, exigindo práticas laboratoriais para a determinação das fitomassas.

Hunt (1990) e Birchler *et al.* (1998) recomendam que o índice de qualidade de Dickson para espécies florestais em viveiro deve ser menor que 10 e maior que 0,2, respectivamente, para que a muda apresente alta qualidade, ou seja alta taxa de crescimento e sobrevivência após o plantio. O IQD do controle e do tratamento M1 estão apresentados na Tabela 4.

Figura 11: Recipientes contendo mudas de Manacá e Eucalipto no início e no final do experimento com os tipos de solo C (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza).



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Tabela 4: Resultado do IQD das mudas de Manacá e Eucalipto submetidas aos tipos de solo Controle (100% solo comercial) e M1 (50% lodo + 50% solo comercial).

Espécies	IQD Controle
Manacá da Serra (<i>Pleroma mutabile</i>)	0,92
Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)	0,17
IQD M1	
Manacá da Serra (<i>Pleroma mutabile</i>)	0,84
Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)	0,25

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O IQD obtido tanto para o tratamento M1 (50% lodo + 50% solo comercial) quanto para o Controle (100% solo comercial) se enquadraram nos padrões estabelecidos pela literatura, sendo considerados satisfatórios e indicando que as mudas possuem qualidade adequada para o transplante no campo. Especificamente para a espécie de eucalipto, o IQD no tratamento M1 foi ligeiramente superior ao do Controle. Segundo Caldeira *et al.* (2012), quanto maior o valor do IQD, melhor é o

padrão de qualidade das mudas, reforçando a possível viabilidade do uso de lodo no substrato.

Esses resultados são consistentes com os obtidos no estudo de Vieira (2022), que investigou o uso de lodo de esgoto como substrato alternativo na produção de mudas de *Cedrela fissilis* VELL. No estudo, um substrato com 60% de lodo apresentou um IQD de 0,54, enquanto o tratamento sem lodo resultou em um IQD de 0,16. Esses dados indicam que o lodo utilizado proporcionou um IQD satisfatório, ao contrário do tratamento sem lodo, que não atingiu o mesmo nível de qualidade.

Um resultado semelhante foi observado nos estudos de Melo *et al.* (2021), que utilizou o lodo na produção de mudas de *Hovenia dulcis* (Rhamnaceae). O estudo constatou que a utilização de lodo aumentou proporcionalmente o IQD das mudas.

5.5 Ecotoxicidade Aguda com *Daphnia magna*

Para realização deste teste, os extratos solubilizados, preparados conforme descrito anteriormente na seção 4.9.1, foram submetidos à avaliação do parâmetro de pH. Um ajuste do pH foi realizado para assegurar que estivesse dentro da faixa de sobrevivência do microcrustáceo, evitando que o resultado do teste fosse influenciado por essa questão. As medições e ajustes de pH estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5: Ajustes de pH realizados nos extratos solubilizados nas amostras controle (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza).

Amostra	pH inicial	pH final
Controle	7,58	7,80
M1	8,36	7,78
M2	9,30	7,87
M3	9,30	7,97

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após o tempo de prova (48 horas), observou-se o número de indivíduos imóveis por concentração (solução teste) em cada mistura analisada e no controle, realizado com água do cultivo dos microcrustáceos. Com base nesse levantamento

(Tabela 6) foi possível conhecer a toxicidade aguda em meio aquático de cada amostra analisada.

Para garantir a validade do teste, é necessário que a porcentagem de organismos imóveis no grupo controle (do teste) seja igual ou inferior a 10%. Neste caso, nenhum organismo foi negativamente afetado, o que valida o teste.

De acordo com a norma NBR 12.713, o valor de Fator de Toxicidade (FT) não é calculável e deve ser expresso pelo valor de FD (Fator de Diluição) correspondente à maior concentração da amostra na qual não se observa imobilidade superior a 10% dos organismos-teste (indivíduos). Nesse contexto, as misturas Controle e M1 apresentam toxicidade equivalente a 2 FD, indicando que essas amostras são tóxicas para o meio aquático, do ponto de vista da toxicidade aguda. Para evitar este efeito no meio aquático, essas misturas deveriam ser diluídas em pelo menos 50% de sua concentração original

Tabela 6: Resultados dos ensaios de toxicidade aguda para *D. magna* nas amostras Controle (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial), M3 (70% lodo + 30% cinza) e Padrão (água de cultivo)

Solução teste (%)	Número total de indivíduos	Mortalidade (un)	Mortalidade (%)
Amostra Controle			
100	20	7	35
50	20	0	<u>0</u>
25	20	0	0
12,5	20	0	0
Amostra M1			
100	20	20	100
50	20	0	<u>0</u>
25	20	0	0
12,5	20	0	0
Amostra M2			
100	20	20	100
50	20	12	60
25	20	1	<u>5</u>
12,5	20	0	0
Amostra M3			
100	20	20	100
50	20	14	70
25	20	2	<u>10</u>
12,5	20	0	0
Padrão – NBR 12.713/22			
Água do cultivo	20	0	0

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quanto às misturas M2 e M3, essas têm toxicidade equivalente a 4 FD, o que também configura toxicidade aguda, porém em quantidade superior. Portanto, seria necessário diluir as amostras em pelo menos 25% de sua concentração original para não causar efeitos tóxicos no meio aquático.

Portanto, embora as amostras apresentadas (diluições) não demonstrem toxicidade aguda nas diluições apresentadas, isso não garante que a amostra seja inofensiva para o organismo. É possível que ela apresente toxicidade após um período prolongado/crônico de exposição (RAND, 1995). Os testes de toxicidade crônica são essenciais para avaliar os possíveis efeitos tóxicos de substâncias químicas sob condições de exposições prolongadas a concentrações sub-letais. Esses testes permitem uma análise mais abrangente dos riscos ambientais associados a uma substância química ao longo do tempo.

Diante disso, prosseguiu-se com a investigação realizando o ensaio crônico para as concentrações de cada amostra que não apresentaram imobilidade superior a 10% nos organismos-teste.

5.6 Ecotoxicidade Crônica com *Daphnia magna*

O teste de toxicidade crônica com *Daphnia magna* depende diretamente dos resultados do teste de toxicidade aguda, pois as concentrações utilizadas no teste crônico são pré-definidas pelo ensaio agudo. Dessa forma, cada material analisado neste ensaio foi submetido a concentração que não causou mais de 10% de mortalidade ao longo das 48 horas.

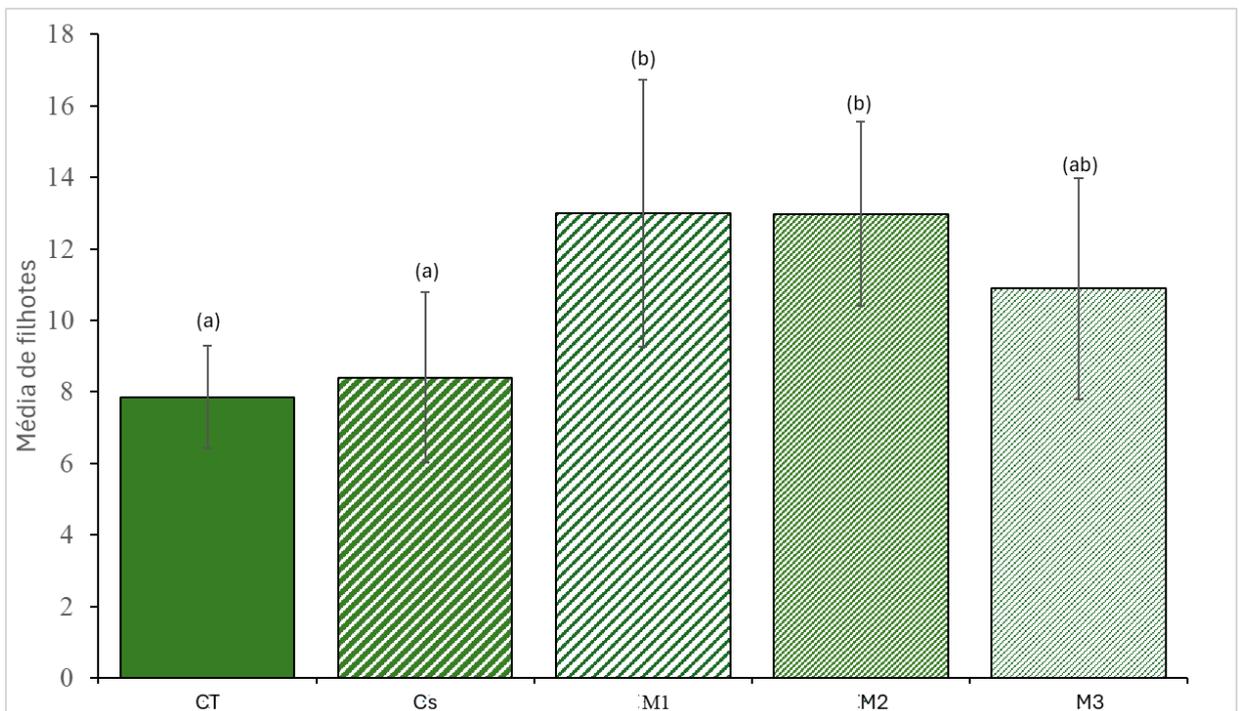
Nos testes desenvolvidos para controle (validação) do ensaio crônico com o meio natural, observou-se que 100% dos organismos apresentaram uma longevidade de 21 dias. Este resultado assegura a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos no ensaio. Os dados demonstram que os resultados obtidos na pesquisa para o controle estão dentro do esperado, quando comparados com os resultados de Xuehua (2022). Esses resultados mostraram que, para assegurar a validade do teste, é necessário que o controle apresente pelo menos 80% de sobrevivência dos organismos adultos, ou seja, 80% de *D. magna* com uma longevidade de 21 dias.

Durante o teste, foram analisados os parâmetros de longevidade e fecundidade. A longevidade da *D. magna* exposta às misturas e ao controle não foi

negativamente afetada, pois não houve mortalidade ao longo dos 21 dias. Portanto, não foram observados efeitos de toxicidade crônica. Em razão da ausência de efeito tóxico nas amostras, não foi possível determinar a CEO e a CENO.

A reprodução do microcrustáceo foi observada considerando o número médio de filhotes gerados por postura em cada réplica, aplicando a Equação 3, supracitada. A média de filhotes produzidos por *D. magna* em cada tratamento é representada pelas barras com erro padrão (linhas verticais) na Figura 12.

Figura 12: Média de fecundidade dos organismos *D. magna* para os tratamentos Controle Teste (CT) (água de cultivo), Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza). Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O controle do teste (CT) representa o padrão do experimento, identificado pela letra "a" no teste de Tukey a 5% de significância. Ao comparar com as demais formulações testadas, observa-se que o controle solo (Cs) é estatisticamente idêntico ao CT, o que indica que o solo utilizado no teste não influenciou negativamente os resultados.

Já para as formulações contendo misturas de lodo, cinza e solo, houve um impacto significativo, com os dados se diferenciando do controle. Isso sugere um efeito negativo na fecundidade de *Daphnia magna*. Um aumento na fecundidade, em relação ao controle, não deve ser visto como um efeito positivo; ao contrário, a literatura aponta que esse aumento

pode ser um indicativo de estresse ambiental ou de distúrbios fisiológicos causados pela exposição a substâncias tóxicas presentes nos resíduos (OLLA *et al.*, 1980).

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com os achados de Flohr *et al.* (2012), que investigaram a toxicidade aguda e crônica de resíduos sólidos industriais, incluindo os da indústria têxtil. Nesse estudo, foi observado que algumas soluções não demonstraram toxicidade aguda para *Daphnia magna*, no entanto, quando submetidas ao teste crônico, todas as amostras também apresentaram toxicidade.

Esses resultados podem estar relacionados à presença de metais no extrato lixiviado. Um estudo realizado por Cooper *et al.* (2009), que investigou a toxicidade de cobre, chumbo e zinco para organismos sensíveis, incluindo *Daphnia magna*, revelou que concentrações de 0,0179 mg/L foram suficientes para causar efeitos tóxicos em 90% dos organismos. Comparando esses dados aos níveis de zinco encontrados no extrato solubilizado dos resíduos de lodo e cinza (Anexo), que são de 0,3074 mg/L e 0,2543 mg/L, respectivamente, é possível observar uma concentração significativamente maior, que pode estar relacionado ao mecanismo de resposta ao estresse, onde os organismos, diante as condições tóxicas, aumentam a reprodução como estratégia de sobrevivência.

5.7 Ecotoxicidade com sementes de *Eruca sativa*

Durante os estágios iniciais de desenvolvimento das plântulas, uma variedade de processos fisiológicos ocorre, os quais podem ser afetados pela presença de toxinas. Os bioensaios são baseados nesse princípio, onde os parâmetros de análise incluem o crescimento da radícula e do hipocótilo, que indicam a capacidade da plântula de se estabelecer e se desenvolver, afetando diretamente a germinação (Rocha, 2017). Assim, as sementes submetidas ao teste foram avaliadas quanto aos a esses parâmetros (germinação e crescimento da radícula).

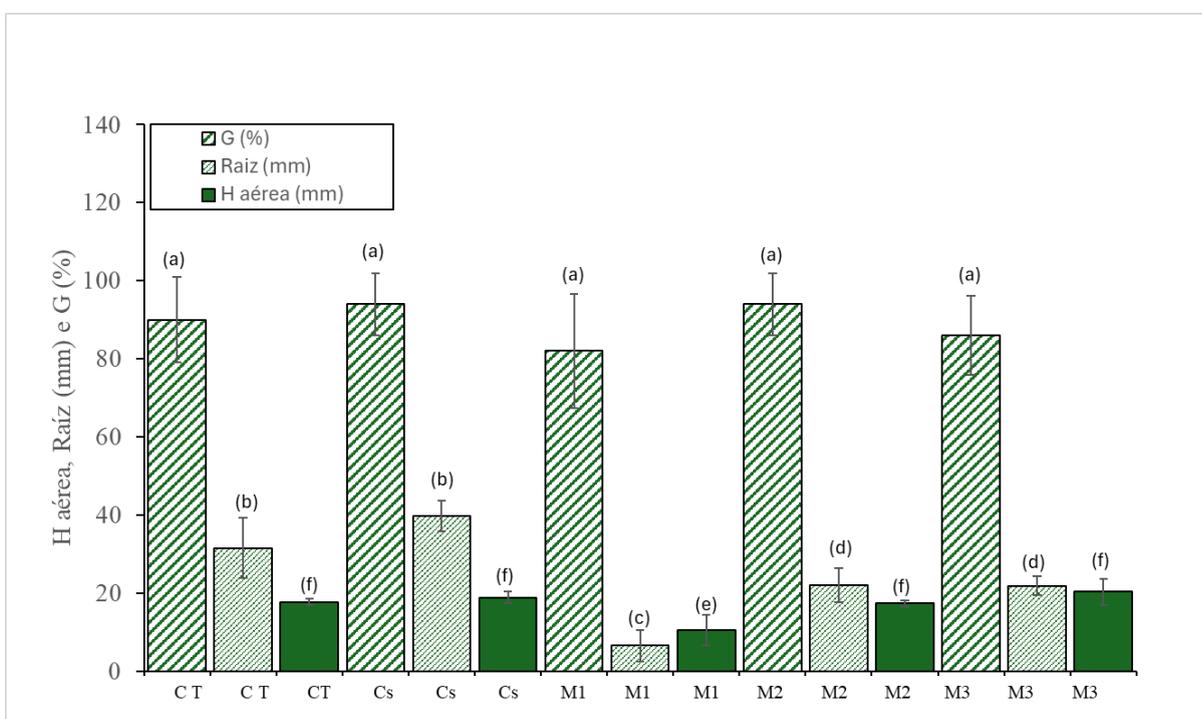
O resultado do percentual de germinação (%G) foi calculado com o auxílio da Equação 5 supracitada, e podem ser observamos na Figura 13. Em conjunto o gráfico apresenta os valores de três parâmetros medidos (índice de germinação %G, comprimento de raiz e comprimento da parte aérea) no teste de toxicidade com sementes de rúcula em diferentes tratamentos.

O índice de germinação (%G) da amostra CT foi alto, aproximadamente 100%, o que é esperado para o controle positivo. Isso indicou que as sementes eram viáveis para o teste.

Verifica-se que o solo comercial (Cs) obteve os mesmos valores que o controle do teste (CT), ou seja, os resultados dos demais tipos de solo contendo resíduo (M1, M2 e M3), não sofreram influência do solo comercial utilizado.

Em termos de percentual de germinação (%G), não foram observadas diferenças significativas entre o controle e os tipos de solo utilizado, ou seja, o percentual de germinação ficou em torno de 90%.

Figura 13: Comparação dos Índices de Germinação (%G), comprimento de raiz (mm) e comprimento de parte aérea (mm) entre as misturas CT (controle do teste ou padrão) Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para as sementes de rúcula submetidas no teste. Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.



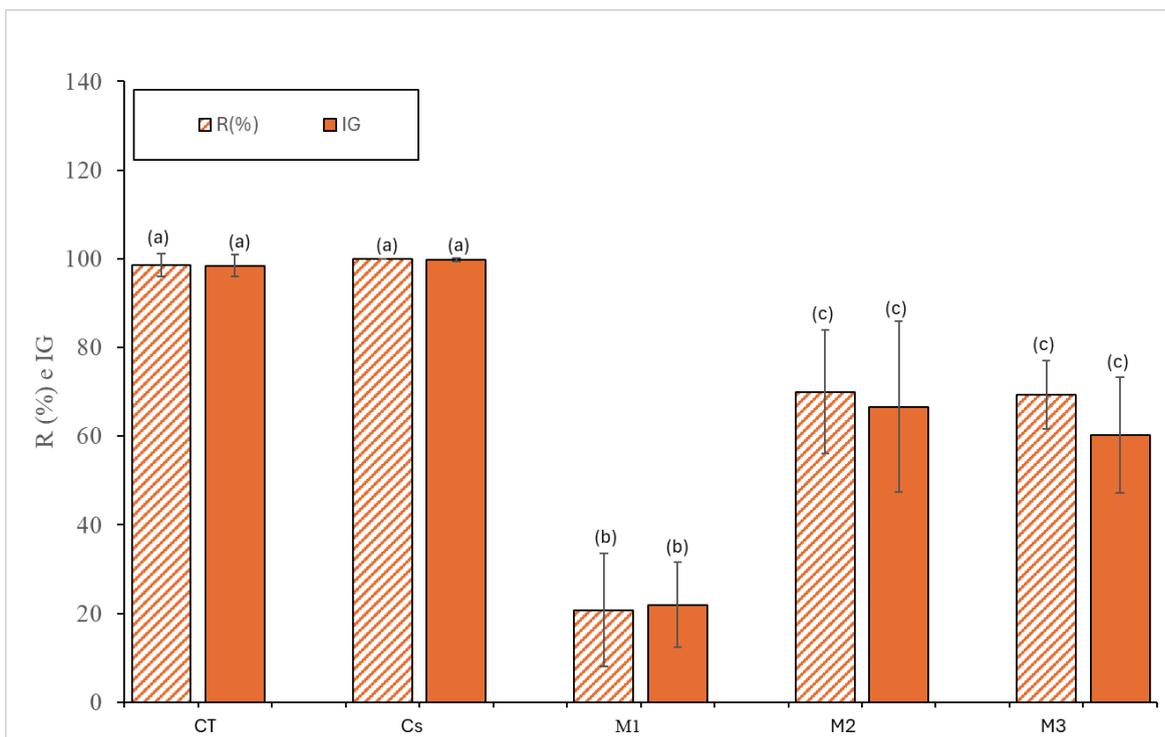
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

No entanto, quando se observa o comprimento da raiz (mm), verifica-se que M1, M2 e M3 apresentaram valores inferiores ao controle, sendo o menor obtido com M1 (6,6mm). A redução significativa no comprimento das raízes em M1, M2 e M3 pode ser atribuída à presença de substâncias tóxicas nas misturas. Estudos mostram que as raízes são particularmente sensíveis a contaminantes no solo, como metais pesados e compostos orgânicos tóxicos (Song *et al.*, 2021).

Quanto à parte aérea, o M1 foi o único tipo de solo que apresentou menor crescimento (10,6 mm). Os solos M2 e M3, apresentam cinzas na sua formulação, o que pode ter influenciado para um melhor desenvolvimento da parte aérea (ARRUDA, 2016; HANSTED, 2020).

Esse melhor desempenho pode estar relacionado à composição das cinzas vegetais, que são produtos da queima de materiais orgânicos e contêm elementos essenciais para a nutrição das plantas, como magnésio, fósforo e potássio. Além disso, as cinzas podem contribuir para reduzir a acidez do solo e aumentar sua fertilidade, proporcionando um ambiente mais favorável para o crescimento das plantas (FERREIRA *et al.*, 2012).

Figura 14: Comparação dos Índices de Alongamento de Raiz (%R) e Índice de Germinação (IG) entre as misturas CT (controle do teste ou padrão) Cs (100% solo comercial), M1 (50% lodo + 50% solo comercial), M2 (40% lodo + 30% cinzas + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) para as sementes de rúcula submetidas no teste. Letras iguais significam médias sem diferença estatisticamente significativa pelo teste de Tukey com nível de significância de 0,05.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em termos de percentual do alongamento de raiz (%R) e índice de germinação (IG), observa-se (Figura 15) que o solo comercial (Cs) apresentou

comportamento idêntico ao controle do teste (CT). O mesmo não ocorreu com M1, apresentando o menor valor de R(%) (20,8) e conseqüentemente, o menor valor de IG (22). Já, M2 e M3, não apresentaram diferença significativa entre si, mas valores menores que CT e Cs.

Novamente, pode ser que a presença de cinzas na formulação de M2 e M3, pode ter proporcionado este melhor desempenho em comparação a M1, que não contém cinzas.

5.8 Qualidade Microbiológica Lodo, Cinza, Solo e Misturas

Para validar o teste de qualidade microbiológica, foi realizado o procedimento com uma amostra de água tratada fornecida pela companhia de abastecimento do município. Como resultado, a amostra não apresentou existência de coliformes termotolerantes e coliformes totais, o que é esperado, pois serve como referência para comparar com as outras amostras (Tabela 7).

Tabela 7: Resultado do teste de qualidade microbiológica.

Amostras	Coliformes Termotolerantes (NMP)	Coliformes Totais (NMP)
Controle*	0	0
Lodo (1;0;0)	> 2419,6	> 2419,6
Cinza (0;1;0)	0	0
Solo (0;0;1)	0	52,5
M1 (1;0;1)	> 2419,6	> 2419,6
M2 (1,3;1;1)	> 2419,6	> 2419,6
M3 (2,3;1;0)	> 2419,6	> 2419,6

*Controle do teste, realizando com água tratada. NMP: Número Mais Provável.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com relação ao lodo têxtil, este apresentou a incidência, acima do limite de detecção (> 2419,6 NMP) para ambos os tipos de coliformes. Este resultado é previsto pois, este resíduo é tratado por sistema biológico (EPA, 2003).

Os coliformes totais são bactérias gram-negativas, não esporuladas, aeróbias ou anaeróbias facultativas, capazes de fermentar a lactose e produzir gás a 35°C em 24 a 48 horas. Já os coliformes termotolerantes são bactérias capazes de fermentar a lactose e produzir gás em 24 horas a uma temperatura um pouco mais elevada, entre 44,5 e 45,5°C. Os termotolerantes, também conhecidos como coliformes

fecais, foram inicialmente definidos para incluir apenas bactérias de origem exclusiva do trato gastrointestinal, como *Escherichia coli*. No entanto, sabe-se atualmente que esse grupo também inclui bactérias de origem não fecal, como *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter cloacae* e *Citrobacter freundii* (APHA, 1999). Portanto, quando dizemos que uma amostra apresenta coliformes termotolerantes, não necessariamente significa que a amostra possui contaminação com coliformes fecais.

Os valores apresentados para o lodo, indicam uma carga microbiológica significativa, que pode ser problemática se não for tratada adequadamente, visto que, a presença destes microrganismos pode ocasionar doenças graves à seres humanos, como por exemplo meningite (sistema nervoso, em neonatos), gastroenterite (estômago), cistite (sistema urinário), entre outras (NORONHA, 2019).

Por outro lado, o resíduo cinza de caldeira não manifestou para coliformes totais e termotolerantes, o que era previsível, pois este resíduo não sofre tratamento biológico. Neste caso, o resíduo é isento de contaminação bacteriana.

O solo empregado no estudo, denominado como “controle” apresentou incidência apenas de coliformes totais. Conforme Rice *et al.* (2017), os coliformes totais incluem uma variedade de bactérias que podem ser naturalmente encontradas em ambientes como solo, vegetação e água e não estão necessariamente relacionadas a alguma contaminação. Adicionalmente, a contagem de coliformes totais de 52,5 NMP, está bem abaixo do limite permitido de 10^3 NMP.

A respeito das misturas de lodo, cinza e solo (M1, M2 e M3) realizadas neste estudo, todas excederam o valor de 2419,6 NMP para ambos os microrganismos estudados, muito acima do limite de 10^3 NMP, permitido pela CONAMA 498/20 para a incorporação no solo, indicando alta contaminação.

Com base nesses resultados, pode-se inferir que a cinza demonstrou ser um resíduo adequado para incorporação no solo, considerando sua qualidade microbiológica, enquanto o lodo requer tratamentos adicionais para alcançar um nível seguro nesse aspecto. Portanto, de acordo com as diretrizes da CONAMA 498/20, métodos de secagem e/ou adição de álcali (atingindo pH 12 por 2 horas e 11,5 por mais 22 horas) devem ser aplicados para a higienização do lodo nesse contexto.

6. CONCLUSÃO

De acordo com as normativas brasileiras, para que resíduos possam ser incorporados ao solo, é necessário atender a certas condições. Entre essas condições, destacam-se a realização de um processo de redução de vetores, a garantia da qualidade microbiológica, e o cumprimento dos limites estabelecidos para algumas substâncias químicas. Os testes realizados neste estudo indicam que o lodo têxtil requer processos adicionais para reduzir a atratividade de vetores e garantir a qualidade microbiológica, especialmente no que se refere à presença de *Escherichia coli*. No âmbito do resíduo cinza de caldeira, essas condições não se fazem necessárias pois o resíduo não tem origem biológica. Contudo, o lodo e a cinza estão em total conformidade com as exigências normativas para as substâncias químicas, inclusive atendendo aos critérios mais rigorosos que classificam os bio sólidos em classes 1 e 2 com base em suas características químicas. Dessa forma, por estar enquadrado na classe mais restritiva (Classe 1), não possuem limites para taxa máxima anual (kg/ha/ano) nem para carga máxima acumulada (kg/ha), que dizem respeito às quantidades incorporadas de material ao solo.

De forma sucinta, para incorporar o lodo têxtil ao solo, seja isoladamente ou combinado com cinzas em diferentes proporções, é necessário aplicar tratamentos adicionais ao lodo, como os especificados pela legislação brasileira na Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020). Esses tratamentos, que incluem a adição de álcalis ou a aplicação de secagem, permitiriam que o lodo fosse adequadamente preparado para a incorporação ao solo.

Os resultados de rendimento no plantio de Manacá (*Pteroma mutabile*) e Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) indicam que as diferentes combinações de resíduos não impactaram o Índice de Robustez (IR) de ambas as espécies. Em termos de Aumento de Altura (AH), as misturas M2 (40% lodo + 30% cinza + 30% solo comercial) e M3 (70% lodo + 30% cinza) apresentaram crescimento inferior ao Controle, mas sem apresentar anomalias no IR (H/DC). No que diz respeito ao Índice de Qualidade Dickson (IQD), a mistura M1 (50% lodo + 50% solo comercial) superou as expectativas em comparação com o controle para as mudas de eucalipto.

Conforme os testes de toxicidade aguda realizados com *Daphnia magna*, tanto o Controle quanto a mistura M1 não seriam considerados tóxicos se diluídos pelo menos 2 vezes, enquanto as misturas M2 e M3 não apresentariam toxicidade se diluídas pelo menos 4 vezes. Com base nessas diluições, o estudo avançou para o teste de exposição crônica, onde se concluiu que essas diluições não resultam em anormalidades na longevidade dos microcrustáceos. No entanto, observou-se um aumento na fecundidade dos daphnídeos, o que pode ser interpretado como um indicador de toxicidade, refletindo uma possível resposta de sobrevivência ao estresse ambiental.

No teste de toxicidade realizado com sementes de rúcula (*Eruca sativa*), foi observado que, entre os parâmetros estatisticamente analisados, o Índice de Germinação (%G) não apresentou diferenças significativas em comparação com o controle, indicando uma germinação normal em todas as misturas testadas. No entanto, os padrões de Alongamento de Raiz (%R) e Altura da parte aérea revelaram variações mais marcantes. A mistura M1 foi a que mais apresentou diferença estatística em relação ao controle, o que pode ser atribuído à ausência de cinzas em sua formulação.

Em resumo, nos testes de desempenho de plantio, a mistura M1 (50% lodo + 50% solo) apresentou o melhor desempenho, assim como nos testes de toxicidade com *Daphnia magna*. Contudo, essa mesma mistura foi menos favorável nos testes de toxicidade com *Eruca sativa*. Portanto, os resultados deste estudo destacam a importância de avaliar não apenas a composição química e o desempenho de qualidade dos resíduos, mas também os parâmetros toxicológicos, antes de seu uso, para evitar possíveis impactos ecológicos adversos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda há diversas oportunidades para aprofundamento em pesquisas futuras relacionadas ao tema deste estudo. A seguir, apresento algumas sugestões:

- Realizar testes de toxicidade adicionais com os resíduos e suas formulações após aplicação dos tratamentos adicionais sugeridos (adição de álcali ou secagem) para melhor compreender seu impacto se incorporado ao solo;

- Avaliar a melhor tecnologia de higienização/tratamento adicional do lodo;
- Realizar análise de viabilidade econômica para a tecnologia de higienização/tratamento adicional do lodo e destinação para uso em solo em contrapartida com os métodos atuais (aterro).

REFERÊNCIAS

- ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil. **Perfil do Setor**. [S. l.], fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em 27 abr 2022.
- ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil. **Relatório de Atividades ABIT 2019**. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em 27 abr 2023.
- ANDRADE, Edna Aparecida de *et al.* **Adubação da cultura da soja com cinzas de biomassa florestal**. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: **Resíduos Sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.713: **Ecotoxicologia aquática – Toxicidade Aguda – Método de ensaio com *Daphnia spp.*** (Cladocera, Crustacea). Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; NBR 12.648: **Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com algas (*Chlorophyceae*)**. 2^a. ed., Rio de Janeiro, 2018.
- ARSLAN-ALATON, I.; GURSOY, B. H.; SCHMIDT, J. E. Advanced oxidation of acid and reactive dyes: Effect of Fenton treatment on aerobic, anoxic and anaerobic processes. **Dyes and Pigments**, v. 78, p. 117-130, 2008.
- ARRUDA, J. A. *et al.* “Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas.” **Revista Principia**, v. 1, n. 30, p. 18-30, 2016.
- MACDICKEN, K. G. Global Forest Resources Assessment 2015: What, why and how? Forest Ecology and Management.
- ALCÂNTARA, M. R., DALTIM, D. A química do processamento têxtil. **Química nova**, v. 19, n. 3, p. 320-330, 1996.
- APHA -American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th edition. New York, 1999.

AZEVEDO, I. M. G.; ALENCAR, R. M.; BARBOSA, A. P.; ALMEIDA, N. O. Estudo do crescimento e qualidade de mudas de marupá (*Simarouba amara* Aubl.) em viveiro. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, p. 157-164, 2010.

BASU, M.; PANDE, M.; BHADORIA, P. B. S; MAHAPATRA, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**, v. 19, n.10, p. 1173-1186, 2009.

BELO, S.R.S. **Avaliação de fitotoxicidade através de *Lepidium sativum* no âmbito de processos de compostagem**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2011.

BIRCHLER, T.; ROSE, R. W., ROYO, R.; PARDOS, M. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, v. 7, n. 1, p. 109-121, 1998.

BORMA, L. S. *et al.* Utilização de cinza no contexto da reabilitação de áreas de mineração de carvão. In: **Proceedings of 5th Brazilian congress on environmental geotechnics**, Porto Alegre (in Portuguese). 2003.

BRASIL. Instrução Normativa nº 76 de julho de 2017 que regulamenta Emissão de AuA para utilização de resíduos classes I, IIA ou IIB como insumos em processos industriais ou construtivos. Disponível em <<https://in.ima.sc.gov.br/>>. Acesso em: 28 set 2023.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 15 ago. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Brasília: MAPA/Secretaria de Defesa Agropecuária, 2009, p. 399.

BRENTANO, D. M. **Desenvolvimento e aplicação do teste de toxicidade crônica com *Daphnia magna*: avaliação de efluentes tratados de um aterro sanitário**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 130 p. 2006.

BECIDAN, Michaël; TODOROVIC, Dusan; SKREIBERG, Oyvind; KHALIL, Roger A.; BACKMAN, Rainer; GOILE, Franziska; SKREIBERG, Alexandra; JOVOVIC, Aleksandar; SOUM, Lars. Ash related behavior in staged and non-staged combustion of biomass fuels and fuel mixtures. **Biomass and Bioenergy**, v. 41, p. 86-93, 2012.

BERTOLAZI, Kaique Bizon *et al.* Viabilidade da aplicação de composto de lodo de esgoto no cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 72-78, 2016.

BIONDI, C. M. Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do estado de Pernambuco. [s.l.] Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

BONFIM-SILVA, E.M.; CABRAL, C.E.A.; SILVA, T.J.A.; MOREIRA, J.C.F.; CARVALHO, J.C.S. Cinza vegetal: características produtivas e teor de clorofila do capim-marandu. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1215-1225, 2013.

BORSZOWSKI, Paulo Rogério; ANHAIA, Sônia Ferreira. UTILIZAÇÃO DE CINZA DE BIOMASSA VEGETAL: CORRETIVO PARA ACIDEZ DO SOLO E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS. **Revista Techno Eng.** ISSN 2178-3586, v. 1, 2020.

CABRAL, F.N. **Calophyllum in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB6827>>. Acesso em: 17 mai. 2024.

CALDEIRA, M.V.W., Peroni, L., Gomes, D.R., Delarmelina, W.M. & Trazzi, P.A. 2012. Diferentes proporções de bio-sólido na composição de substratos para a produção de mudas de timbó (*Ateleia glazioviana* Baill). **Scientia Forestalis** 40:15-22.

CARDOSO, A. M. S. **Gestão da demanda industrial de água: coeficientes e medidas de redução de consumo (caso de estudo: indústria têxtil em Campina Grande-PB)**. 2018.

CINTRA, A. P. U. **Disponibilidade de nutrientes e metais pesados em milho cultivado com lodo de lavanderias industriais em latossolo vermelho distrófico**. Universidade Estadual de Maringá. Tese de doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Maringá, 2010.

COELHO, R.L.G. **Allophylus in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB20873>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. 2017. Resolução CONSEMA nº 109/2017 - **Estabelece as diretrizes e critérios para a utilização de resíduos classes I, IIA ou IIB como insumos na agricultura, silvicultura, em processos industriais ou construtivos, e adota outras providências**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=351300>>. Acesso em: 14 mar 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2020. **Resolução CONAMA nº498/2020 - Define os critérios e procedimentos para a produção e aplicação de bio-sólido em solos, e dá outras providências**. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=726> Acesso em: 14 mar 2023.

CONSIDERA, Claudio. **Indústria de transformação brasileira: À beira da extinção.** FGV. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/artigos/industria-transformacao-brasileira-beira-extincao>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

COOPER, Naomi L.; BIDWELL, Joseph R.; KUMAR, Anu. Toxicity of copper, lead, and zinc mixtures to *Ceriodaphnia dubia* and *Daphnia carinata*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 72, n. 5, p. 1523-1528, 2009.

CORREIA, C. H. G. **Reuso de resíduo de areia descartada de fundição (adf) – uma avaliação técnica e toxicológica do processo de produção de fritas cerâmicas em escala laboratorial.** Universidade da Região de Joinville (Univille) - Dissertação de Mestrado. Joinville, p. 77. 2015.

COSTA, C. R., OLIVE, P., BOTTA, C. M. R., ESPINDOLA, E. L. **A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação.** Química Nova, v. 31 (7), p. 1820-1830, 2008.

CUBI Energia. **Consumo de Energia na Indústria Têxtil.** 2022. Disponível em: <<https://www.cubienergia.com/consumo-de-energia-industria-textil/>>. Acesso em: 26 set 2023.

CUNHA, Ana Luíza Xavier *et al.* Tratamento físico-químicos de efluente têxtil utilizando Sulfato de Alumínio, Carvão Ativado e Moringa Oleifera. **Revista Geama**, v. 5, n. 3, p. 47-55, 2019.

CRUZ, Jean C. *et al.* Synthesis and characterization of cobalt nanoparticles for application in the removal of textile dye. **Journal of environmental management**, v. 242, p. 220-228, 2019.

DIAS, L.P.R., GATIBONI, L.C., BRUNETTO, G., SIMONETE, M.A. & BICARATTO, B., 2015. Eficiência relativa de fosfatos naturais na adubação de plantio de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden e *Eucalyptus benthamii* Maiden e Cambagem em solo sem e com calagem. **Ciência Florestal**, vol. 25, no. 1, pp. 37-48.

EPA - Environmental Protection Agency. (2003). **Environmental regulations and technology: Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge.** Disponível em: <https://www.epa.gov/biosolids/control-pathogens-and-vector-attraction-sewage-sludge> e. Acesso em: 08 mai 2024.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **For. Chron.**, v. 36, p. 10-13, 1960.

SILVA, D, P., LANDGRAF, M. e REZENDE, M. Uso de bioensaios para avaliar o efeito da toxicidade aguda, reprodução e aumento de biomassa de minhocas Eisenia

fetida em lodo de esgoto doméstico aclimatado. **Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology**, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/235762346_Use_of_bioassays_to_evaluate_the_effect_of_acute_toxicity_reproduction_and_increase_of_biomass_of_earthworms_Eisenia_fetida_in_acclimated_domestic_domestic_sewage_sludge> . Acesso em: 28 mai 2024.

FARIAS, S.Q. **Alchornea in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB17456>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

FAUSTINO, R.; KATO, M. T.; FLORÊNCIO, L., GAVAZZA. S. 2005. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de Senna siamea Lam. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB, v 9, p 278-28. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em 29 set 2023.

FERREIRA, E. P. B.; FAGERIA, N. K.; DIDONET, A. D. Chemical properties of an Oxisol under organic management as influenced by application of sugarcane bagasse ash. **Revista Ciência Agronômica, Fortaleza**, v. 43, n. 2, p. 228-236, 2012.

FISCHER, S. O. **Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia**. 2015. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville, Joinville.

FLORES, T.B. **Meliaceae in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB9990>>. Acesso em: 16 mai 2024.

FLOHR, C. J. AB., MATIAS, W. G. Acute and chronic toxicity of soluble fractions of industrial solid wastes on *Daphnia magna* and *Vibrio fischeri*. **Scientific World Journal**. 2012;2012:643904. doi: 10.1100/2012/643904. Epub 2012 Apr 22. PMID: 22619632; PMCID: PMC3347914.

FREIER, M.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M. 2006. Efeitos da aplicação de biossólido no crescimento inicial de *Eucalyptus citriodora* Hook. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v 5, n 2, p 102-107.

FREITAS, M.F. **Myrsine in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB10232>>. Acesso em: 16 mai 2024.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balanco Energético Nacional 2021**. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>> Acessado em: 25 out. 2022.

GALEMBECK, F. Inovação para a sustentabilidade. **Química Nova**, v. 36 (10), p. 1600-1604, 2013.

GARCIA, F.C.P.; BONADEU, F. **Ingá in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB597756>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

GOMES, José Mauro *et al.* Parâmetros morfológicos na avaliação de qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 26, p. 655-664, 2002.

GOTEX. Mercado: **Panorama do setor têxtil e de confecção**. Disponível em: <https://gotexshow.com.br/mercado/>. Acesso em: 27 abr. 2022.

GONZAGA, M. I S; MACKOWIAK. C.; ALMEIDA, A. Q.; JUNIOR, J. I. T. C. SEWAGE SLUDGE DERIVED BIOCHAR AND ITS EFFECT ON THE GROWTH AND MORPHOLOGICAL TRAITS OF *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden SEEDLINGS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 687-695, 2018.

GUEDES, B. F. R. **Desenvolvimento de argamassa com incorporação de lodo de indústria têxtil visando a aplicação sustentável na construção civil**. 66 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, 2012.

Guimarães, P.J.F. **Pleroma in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB603045>>. Acesso em: 17 mai. 2024.

HANSTED, Ana Larissa Santiago. Aproveitamento de cinzas de caldeira para calagem do solo. 2020.

HARALDSEN, T.K.; PEDERSEN, P.A.; GRONLUND, A. Mixtures of bottom wood ash and meat and bone meal as NPK fertilizer. In: INSAM, H.; KNAPP, B.A. (Ed). **Recycling of biomass ashes**. New York: Springer, 2011. chap. 3, p. 33-44.

HUANG, R. B., ZHANG. B., SAAD, E. M., INGALL, E. D., TANG, Y. Evolução da especiação de zinco e cobre durante tratamentos de pirólise e carbonização hidrotérmica de lodos de esgoto. **Água**. p. 260 - 269, 2018.

HUNT, GA. **Effect of styroblock design and cooper treatment on morphology of conifer seedlings**. In: Target Seedlings Symposium, Meeting of The Western Forest Nursery Associations, Roseburg, 1990. Proceedings. Fort Collins: United States Department of Agriculture, Forest Service; 1990. p.218-222.

IGANCI, J. R. V.; DORNELES, M. P. **Araucariaceae in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB33971>>. Acesso em: 16 mai 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBA, 2016. **Relatório Anual 2016**. São Paulo: IBA. 96 p. Disponível em: < http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>. Acesso em: 29 set 2023.

IBRAHIM, João Felipe de Oliveira Nunes *et al.* Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas e no cultivo do eucalipto (*Eucalyptus spp*). **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 2, n. 1, p. 564-579, 2019.

ISO 10706, 2000, Water quality – **Determination of long-term toxicity of substances to Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea)**. 17p.

KANT, Rita. Textile dyeing industry an environmental hazard. **Natural Science**, v. 4, p. 22-26, 2012.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. Allium cepa test in environmental monitoring: a review on its application. Mutation research/reviews in mutation research, v. 682, n. 1, p. 71-81, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>. Acesso em: 19 set. 2023.

LIMA, Márcia Regina Pereira *et al.* Avaliação da qualidade do lodo de esgoto quando submetido à secagem/higienização em estufa agrícola. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica, v. 2, n. 1, p. 41-48, 2009.

LIU, Yang *et al.* Comparative study for fluidized bed pyrolysis of textile dyeing sludge and municipal sewage sludge. **Journal of hazardous materials**, v. 396, p. 122619, 2020.

LOHMANN, L.G. **Handroanthus in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB114069>>. Acesso em: 17 mai. 2024

MADEIRO, Yonara Matos *et al.* ESTIMATIVA ECONÔMICA NO USO DO LODO DE ESGOTO PARA FINS AGRÍCOLAS. 2022. **XIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Teresina/PI.

MANAFI, M. Quantitative determinations of total coliforms and Escherichia coli in marine Waters with chromogenic and & urogenic media. **Journal of Applied Microbiology**, v. 88, n. 2, p. 280-285, 2000.

MARANGONI, B., ZALESKI, A., VANZETTO, S. C., ERECHIM, U. R. I., do Alto Uruguai, R. I., & das Missões-URI, E. Avaliação da Incorporação de Lodo de ETE como Substituição ao Agregado Miúdo na Matriz de Concreto. **Perspectiva**, Erechim. v. 42, n.158, p. 21-30, junho/2018.

MARTINS, M. N. C.; SOUZA, V. V.; SILVA S. T. Cytotoxic, genotoxic and mutagenic effects of sewage sludge on *Allium cepa*. *Chemosphere*, v. 148, p. 481-486, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.071>. Acesso em: 14 jan. 2023.

MARTINS, Pamela Fernanda Carvalho *et al.* **Recuperação de pastagens degradadas com utilização de biossólido e Moringa Oleífera: Revisão**. *Pubvet Medicina Veterinária e Zootecnia, Campo Grande*, v. 16, n. 2, p. 1-17, 2022.

MAZINE, F.F.; BÜNGER, M.; FARIA, J.E.Q.; FERNANDES, T.; GIARETTA, A.; VALDEMARIN, K.S.; SANTANA, K.C.; SOUZA, M.A.D.; SOBRAL, M. **Eugenia in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB10419>>. Acesso em: 16 mai. 2024

MELO, W. J.; MARQUES, M.O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Eds. *Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto*. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, p. 109-141, 2000.

MELO, Henrique Souto *et al.* Uso de lodo de esgoto na produção e na qualidade de mudas e teores de nutrientes em *Hovenia dulcis* (Rhamnaceae). *Iheringia, Série Botânica*, v. 76, 2021.

MENDES, C. R.; DILARRI, G.; PELEGRINI, R. T. Aplicação da biomassa *Saccharomyces cerevisiae* como agente adsorvente do corante Direct Orange 2GL e os possíveis mecanismos de interações adsorbato/adsorvente. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, p. 898-908, 2015.

MENDES, H.S.J., PAULA, N.F., SCARPINATI, E.A. & PAULA, R.C., 2013. Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **Cerne**, vol. 19, no. 4, pp. 603-611.

MENDES. S., I.; LOPES, J.C.; SILVA, L.V.; BAZZANTE, M.L. **Annona in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB117159>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

MOURA, LS de.; REIS, AC dos S.; SILVA, CL.; BEZERRA, JPS.; NÓBREGA, ACV da.; CARNEIRO, AMP. **Avaliação da adesividade do ligante asfáltico modificado com lodo têxtil por meio de processamento digital de imagens**. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, n. 4, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.13975. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13975>.

MOREIRA, Samya *et al.* O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 3, p. 1564-1585, 2019.

NEVES, Daniele Gervazoni Viana das. **Potencial tóxico e mutagênico de efluentes tratados de uma indústria metal mecânica dispostos no solo**. 2014.

NIU, Yanqing; TAN, Houzhang; HUI, Shi'en. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 52, p. 1-61, 2016.

NORONHA, Thiago Henrique et al. Indicador de contaminação fecal alimentar e prevenção de doenças. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos**, v. 2, n. 4, p. 150-157, 2019.

NORSTROM, S.H.; BYLUND, D.; VESTIN, J.L.K.; LUNDSTROM, U.S. **Initial effects of wood ash application to soil and soil solution chemistry in a small, boreal catchment**. *Geoderma*, Amsterdam, v. 187, p. 85-93, 2012.

OLLA, B.L.; PEARSON, W.H.; STUDHOLME, A.L. **Applicability of behavioral measures in environmental stress assessment**. *Rapports et Procès-verbaux des Reunions du Conseil International pour l'exploration de la Mer*. v.179, p.162-173, 1980.

OLIVEIRA, Juliana Ferreira de *et al.* Avaliação da sobrevivência de indicadores bacterianos e vírus durante higienização de lodo de esgoto por secagem térmica em estufa agrícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, p. 1079-1089, 2018.

OLIVEIRA, A.G., BARROS, A.D., LUCENA, L.C.F., LUCENA, A.E.F., & PATRICIO, J.D. (2018). **Evaluation of calcined textile sludge as a stabilizing material for highway soil**. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (English Edition), <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.02.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756418304410>.

PAIVA, Fernanda Rivelli. **Resíduos alcalinos da indústria de celulose para higienização de lodo de esgoto sanitário**. 2015. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

PAIXÃO, Gabriela Barbosa *et al.* O USO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS COMO MATERIAL SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 8, p. 11265-11291, 2023.

PEDUTO, Thais Araujo Goya; JESUS, TA de; KOHATSU, Marcio Yukihiro. Sensibilidade de diferentes sementes em ensaio de fitotoxicidade. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 2, p. 200-212, 2019.

PEDROZA M. M.; VIEIRA G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MIHOMEN, C. C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão**. *Revista Liberato* (Novo Hamburgo), v. 11, p. 147-157, 2010. Disponível em:

http://revista.liberato.com.br/ojs_lib/index.php/revista/article/view/160. Acesso em: 31 maio 2022.

PELLISSARI, Rodrigo Augusto Zembrzuski *et al.* **Lodo de indústria têxtil e água residuária de suinocultura na produção de mudas de eucalipto**. 2007.

PEREIRA, Eduardo Vinícius. **Resíduos sólidos**. Editora Senac São Paulo, 2019.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENNEDETTI, V. 2000. Aplicabilidade do Biossólido em plantações florestais I. Reflexo do ciclo dos nutrientes. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impactos Ambientais do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, cap. 8, p 162-178.

POLASTRI, P., SCANDELA, A. P. J., MARTINS, D. C. C., SILVA, O. H., CHATALOY, R. C. S. **Tecnologias aplicadas no tratamento e disposição final de resíduos sólidos industriais**. In: Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2018, Gramado/RS. IBESAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.

PRETO, E. V.; MORTOZA, G. L. Geração de energia elétrica utilizando biomassa. 2010. 82 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

RAN, Chunmei *et al.* Pyrolysis of textile dyeing sludge in fluidized bed and microwave-assisted auger reactor: Comparison, migration, and distribution of heavy metals. **Energy**, v. 182, p. 337-348, 2019.

RAND, G. M. **Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate, and risk assessment**. Second edition. North Palm Beach, Florida: Taylor e Francis. 1995. 1125p.

RICE, E.W *et al.* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd Edition). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2017.

ROCHA, B.S. **Fitotoxicidade do corante laranja reativo 64 como efluente têxtil tratado por oxidação avançada (US/H₂O₂)**. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2017.

RUIZ, E. T. N. F. **Análise de Investimento em projetos Greenfield de Bioenergia**. Alínea. Campinas: 2015.

VIEIRA, Áquila Filipi Silva. **Utilização do lodo de esgoto como substrato alternativo na produção de mudas de *Cedrela fissilis* VELL**. 2022.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. In: VON SPERLING, M (Org.). **Princípio do tratamento biológico de águas residuárias**, v.1. 3.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. 456p.

SANTOS, A. L. *et al.* **Lodo têxtil como alternativa ecológica de fertilizante agrícola**. São Lourenço - MG, 2011.

SANTOS, B. S. **Caracterização química do lodo proveniente de resíduos do arranjo produtivo local têxtil e confecções para criação de um hidrogel fertilizante com aplicação na potencialização do agronegócio em Pernambuco**. Dissertação de Mestrado UFRPE, 2023.

SEVERINO, L. S., LIMA, R. L. S., BELTRÃO, N. E. M. **Composição química de onze materiais orgânicos utilizados em substratos para produção de mudas**. Campina Grande, Embrapa Algodão, Comunicado Técnico, n. 278, 2006.

SILVA, J. D.; ANDRADE, M. de. Reciclagem de efluentes no processo de tingimento sintético de uma indústria têxtil: estudo de caso. E-Tech: **Tecnologias para Competitividade Industrial**, v.6, n. 1, p. 98-112. 2013.

SILVA, M. T. *et al.* **Biossólido como adubação orgânica no crescimento inicial de mamona**. VI Congresso Brasileiro de Mamona. Fortaleza, CE, 2014. Embrapa Algodão, p. 49.

SILVA, S. P. *et al.* A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, v. 19, n. 2, p. 557-583, 2021.

SILVA, Raphael Corrêa da. **Oligoquetas da espécie Eisenia Andrei como bioindicadores na avaliação do potencial tóxico de latossolos e chernossolos acrescidos de lodo de esgoto**. 2008.

SONG, Y., et al. (2021). **"Impact of Soil Contaminants on Seed Germination and Plant Growth."** Environmental Research.

TANK, V. *et al.* CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA E ECOTOXICOLÓGICA DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL. **OPEN SCIENCE RESEARCH III**, v. 3, n. 1, p. 2914-2930, 2022.

TESTOLIN, Renan C. *et al.* Using textile industrial sludge, sewage wastewater, and sewage sludge as inoculum to degrade recalcitrant textile dyes in a co-composting process: an assessment of biodegradation efficiency and compost phytotoxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 49642-49650, 2021.

TERAN, Francisco Javier Cuba *et al.* Avaliação da recuperação de áreas degradadas por exploração de cascalho laterítico por meio da incorporação de lodo

de esgoto. Estudo de caso no Distrito Federal. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 3243-3255, 2020.

TULER, A.C; Costa, I.R.; Proença, C.E.B. **Psidium in Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB19886>>. Consulta pública. Acesso em: 16 mai. 2024.

TSUTIYA, M. T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de bio-sólidos das estações de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.140, p. 753–761, 2015.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de bio-sólidos. In: **Bio-sólidos na Agricultura**. Editores M. T. TSUTIYA, J. B. COMPARINI, P. A. SOBRINHO, I. HESPANHOL, P. C. T. CARVALHO, A. J. MELO, e M. O. MARQUES - 1ª edição São Paulo: SABESP, 2001. x - 468p.

WACHHOLZ, L. A., & LIZAMA, M. D. L. A. P. **Estudo sobre águas: tecnologias limpas no tratamento de efluentes têxteis**. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/MariaLizama/publication/355672956_Estudo_sobre_aguas_tecnologias_limpas_no_tratamento_de_efluentes_texteis/links/61794bb3eef53e51e1f3c44b/Estudo-sobre-aguas-tecnologias-limpas-no-tratamento-de-efluentes-texteis.pdf> Acesso em: 10 ago. 2023.

COSTA, A. R. S., XIMENES, T. C. F., XIMENES, A. F., & BELTRAME, L. T. C. (2016). The process of composting and its potential in the recycling of organic waste. **Revista Geama**, 1(2), 246–260. Disponível em: <<https://journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/503>> Acesso em: 14 jun. 2023.

XUEHUA, An *et al*. Acute and chronic toxicities of prothioconazole and its metabolite prothioconazole-desthio in *Daphnia magna*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 36, p. 54467-54475, 2022.

ZONATTI, W. F.; AMARAL, M. C.; GASI, F.; BARUQUE-RAMOS, J.; DULEBA, W. Reciclagem de resíduos do setor têxtil e confeccionista no Brasil: panorama e ações relacionadas. **Revista Sustentabilidade em Debate**, v. 6, n. 3, p. 50-69, set/dez 2015.

ZOU, Haiyuan *et al*. The agricultural use potential of the detoxified textile dyeing sludge by integrated Ultrasound/Fenton-like process: A comparative study. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 172, p. 26-32, 2019.

ANEXOS

Tabela 8: Análise físico-química da massa bruta do lodo têxtil.

Parâmetro	Unidade	Relatório 8768/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04
Cianeto	mg/kg	< 10	250
Corrosividade	-	8,94	2,0 a 12,5
Ponto de Fulgor	°C	> 60	PF < 60°C
Reatividade	-	Ausência	Ausência
Sulfeto de Hidrogênio	mg/kg	< 0,2	500

Tabela 9: Análise química do extrato lixiviado do lodo têxtil.

Parâmetro	Unidade	Relatório 8768/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04 - Anexo F
1,1-Dicloroetano	mg/L	< 0,0005	3
1,2-Dicloroetano	mg/L	< 0,0005	1
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	< 0,0005	7,5
2,4,5-T	mg/L	< 0,00002	0,2
2,4,5-TP (Silvex/ Fenoprop)	mg/L	< 0,00002	1
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	< 0,00001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	< 0,00001	20
2,4-D	mg/L	< 0,00002	3
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	< 0,001	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000002	0,003
Arsênio	mg/L	< 0,008	1
Bário	mg/L	< 0,001	70
Benzeno	mg/L	< 0,0005	0,5
Benzeno(a)pireno	mg/L	< 0,000005	0,07
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,01	1
Clordano (Alfa+Gama)	mg/L	< 0,000002	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	< 0,0005	0,5
Clorobenzeno (Monoclorobenzeno)	mg/L	< 0,0005	100
Clorofórmio (Triclorometano)	mg/L	< 0,001	6
Cresóis Totais	mg/L	< 0,00001	200
Cromo	mg/L	< 0,005	5
Endrin	mg/L	< 0,000001	0,06
Fluoretos	mg/L	0,64	150

Heptacloro + Heptacloro epóxido	mg/L	< 0,000002	0,003
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,000001	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	< 0,0005	0,5
Hexacloroetano	mg/L	< 0,000005	3
Lindano (gama-HCH)	mg/L	< 0,000001	0,2
m-Cresol	mg/L	< 0,00001	200
Mercúrio	mg/L	< 0,001	0,1
Metiletilcetona	mg/L	< 0,001	200
Metoxicloro	mg/L	< 0,000001	2
Nitrobenzeno	mg/L	< 0,00005	2
o-Cresol	mg/L	< 0,0001	200
p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD	mg/L	< 0,000003	0,2
p-Cresol	mg/L	< 0,001	200
Pentaclorofenol	mg/L	< 0,0002	0,9
Piridina	mg/L	< 0,001	5
Prata	mg/L	< 0,005	5
Selênio	mg/L	< 0,007	1
Tetracloroetileno	mg/L	< 0,0005	4
Tetracloroto de Crabono	mg/L	< 0,0005	0,2
Toxafeno	mg/L	< 0,000001	0,5
Tricloroetileno	mg/L	< 0,0005	7

Tabela 10: Análise química do extrato solubilizado do lodo têxtil.

Parâmetro	Unidade	Relatório 8768/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04 - Anexo G
2,4,5-T	mg/L	< 0,0002	0,002
2,4,5-TP (Silvex/ Fenoprop)	mg/L	< 0,0002	0,002
2,4-D	mg/L	< 0,0002	0,03
4,4'-DDT (p,p'-DDT)	mg/L	< 0,00001	0,002
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,00002	0,00003
Alumínio	mg/L	< 0,01	0,2
Arsênio	mg/L	< 0,008	0,01
Bário	mg/L	< 0,001	0,7
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	< 0,001	0,07
Clordano (Alfa + Gama)	mg/L	< 0,00002	0,0002
Cloreto	mg/L	168,82	250
Cobre	mg/L	0,0089	2
Cromo	mg/L	< 0,005	0,05
Endrin	mg/L	< 0,00001	0,0006
Fenóis Totais	mg/L	< 0,005	0,01
Ferro	mg/L	< 0,007	0,3
Fluoreto	mg/L	1,06	1,5
Heptacloro + Heptacloro epóxido	mg/L	< 0,00002	0,00003
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,000001	0,001
Lindano (gama-HCH)	mg/L	< 0,00001	0,002
Manganês	mg/L	0,0297	0,1
Mercúrio	mg/L	< 0,001	0,001

Parâmetro	Unidade	Relatório 8768/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04 - Anexo G
2,4,5-T	mg/L	< 0,0002	0,002
2,4,5-TP (Silvex/ Fenoprop)	mg/L	< 0,0002	0,002
2,4-D	mg/L	< 0,0002	0,03
Metoxicloro	mg/L	< 0,00001	0,02
Nitrato-N	mg/L	< 1	10
Prata	mg/L	< 0,005	0,05
Selênio	mg/L	< 0,007	0,01
Sódio	mg/L	< 0,2	200
Sulfato	mg/L	62,53	250
Tensoativos	mg/L	< 0,2	0,5
Toxafeno	mg/L	< 0,00001	0,005
Zinco	mg/L	0,3074	5

Tabela 11: Análise físico-química da massa bruta da cinza.

Parâmetro	Unidade	Relatório 18766/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04
Cianeto	mg/kg	< 1	250
Corrosividade	-	10,88	2,0 a 12,5
Ponto de Fulgor	°C	> 60	PF < 60°C
Reatividade	-	Ausência	Ausência
Sulfeto de Hidrogênio	mg/kg	< 0,2	500

Tabela 12: Análise química no extrato lixiviado da cinza.

Parâmetro	Unidade	Relatório 18766/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04 - Anexo F
1,1-Dicloroetano	mg/L	< 0,0005	3
1,2-Dicloroetano	mg/L	< 0,0005	1
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	< 0,0005	7,5
2,4,5-T	mg/L	< 0,00002	0,2
2,4,5-TP (Silvex/ Fenoprop)	mg/L	< 0,00002	1
2,4,5-triclorofenol	mg/L	< 0,00001	400
2,4,6-triclorofenol	mg/L	< 0,00001	20
2,4-D	mg/L	< 0,00002	3
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	< 0,001	0,13
Aldrin + dieldrin	mg/L	< 0,000002	0,003
Arsênio	mg/L	0,0187	1
Bário	mg/L	0,2633	70
Benzeno	mg/L	< 0,0005	0,5
Benzeno Pireno	mg/L	< 0,000005	0,07
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,001	1
Clordano (alfa+gama)	mg/L	< 0,000002	0,02
Cloreto de vinila	mg/L	< 0,0005	0,5
Clorobenzeno (Monoclorobenzeno)	mg/L	< 0,0005	100
Clorofórmio (Triclorometano)	mg/L	< 0,001	6
Cresóis totais	mg/L	< 0,00001	200
Cromo	mg/L	0,2282	5
Endrin	mg/L	< 0,000001	0,06
Fluoretos	mg/L	0,31	150

Heptacloro + heptacloro epóxido	mg/L	< 0,000002	0,003
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,000001	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	< 0,0005	0,5
Hexacloroetano	mg/L	< 0,000005	3
Lindano (gama-HCH)	mg/L	< 0,000001	0,2
m-cresol	mg/L	< 0,00001	200
Mercúrio	mg/L	< 0,001	0,1
Metiletilcetona	mg/L	< 0,001	200
Metoxicloro	mg/L	< 0,000001	2
Nitrobenzeno	mg/L	< 0,00005	2
o-Cresol	mg/L	< 0,0001	200
p,p'-DDT + p,p'-DDE + p,p'-DDD	mg/L	< 0,000003	0,2
p-cresol	mg/L	< 0,00001	200
Pentaclorofenol	mg/L	< 0,0002	0,9
Piridina	mg/L	< 0,001	5
Prata	mg/L	< 0,005	5
Selênio	mg/L	< 0,007	1
Tetracloroetileno	mg/L	< 0,0005	4
Tetracloroeto de carbono	mg/L	< 0,0005	0,2
Toxafeno	mg/L	< 0,000001	0,5
Tricloroetileno	mg/L	< 0,0005	7

Tabela 13: Análise química no extrato solubilizado da cinza.

Parâmetro	Unidade	Relatório 18766/2023.0.A	ABNT NBR 10.004/04 - Anexo G
2,4,5-T	mg/L	< 0,00002	0,002
2,4,5-TP (Silvex/ Fenoprop)	mg/L	< 0,00002	0,002
2,4-D	mg/L	< 0,00002	0,03
4,4'-DDT (p,p'-DDT)	mg/L	< 0,000001	0,002
Aldrin + Dieldrin	mg/L	< 0,000002	0,00003
Alumínio	mg/L	1,285	0,2
Arsênio	mg/L	< 0,0080	0,01
Bário	mg/L	0,0934	0,7
Cádmio	mg/L	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	< 0,001	0,07
Clordano (Alfa + Gama)	mg/L	< 0,000002	0,0002
Cloreto	mg/L	118,84	250
Cobre	mg/L	0,0755	2
Cromo	mg/L	0,4219	0,05
Endrin	mg/L	< 0,000001	0,0006
Fenóis totais	mg/L	< 0,005	0,01
Ferro	mg/L	0,3657	0,3
Fluoreto	mg/L	< 1	1,5
Heptacloro + Heptacloro epóxido	mg/L	< 0,000002	0,00003
Hexaclorobenzeno	mg/L	< 0,000001	0,001
Lindano (gama-HCH)	mg/L	< 0,000001	0,002
Manganês	mg/L	0,0157	0,1

Mercúrio	mg/L	< 0,001	0,001
Metoxicloro	mg/L	< 0,000001	0,02
Nitrato-N	mg/L	< 1	10
Prata	mg/L	< 0,005	0,05
Selênio	mg/L	< 0,007	0,01
Sódio	mg/L	83,0584	200
Sulfato	mg/L	386,23	250
Tensoativos	mg/L	0,44	0,5
Toxafeno	mg/L	< 0,000001	0,005
Zinco	mg/L	0,2543	5

