RESSALVA

Atendendo a solicitação da autora, Gabriela de Almeida Nascimento, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 06/06/2027.

Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

GABRIELA DE ALMEIDA NASCIMENTO

ANÁLISE DA TOXICIDADE PARA ORGANISMOS AQUÁTICOS DE PERCOLADOS ORIUNDOS DE SIMULAÇÕES DE OBRAS GEOTÉCNICAS, COM INCORPORAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Bauru
2026

GABRIELA DE ALMEIDA NASCIMENTO

ANÁLISE DA TOXICIDADE PARA ORGANISMOS AQUÁTICOS DE PERCOLADOS ORIUNDOS DE SIMULAÇÕES DE OBRAS GEOTÉCNICAS, COM INCORPORAÇÃO DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiana Alves Fiore Pinto
Co-orientadora: Profa. Dra. Suzelei Rodgher

Bauru
2026

N244a

Nascimento, Gabriela de Almeida

Análise da toxicidade para organismos aquáticos de percolados oriundos de simulações de obras geotécnicas, com incorporação de Lodos de Estação de Tratamento de Água / Gabriela de Almeida Nascimento. -- Bauru, 2026

73 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientadora: Fabiana Alves Fiore Pinto
Coorientadora: Suzelei Rodgher

1. Toxicidade. 2. Lodo de Estação de Tratamento de Água. 3. Usos benéficos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GABRIELA DE ALMEIDA NASCIMENTO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 05 de dezembro de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GABRIELA DE ALMEIDA NASCIMENTO, intitulada **Análise da toxicidade para organismos aquáticos de percolados oriundos de simulações de obras geotécnicas, com incorporação de Lodos de Estação de Tratamento de Água**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profª. Drª. FABIANA ALVES FIORE PINTO (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de São José dos Campos - ICT, Prof. Dr. RODRIGO DE FREITAS BUENO (Participação Virtual) do(a) CECS - Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas da UFABC / Universidade Federal do ABC, Profa. Dra. JULIANE SILBERSCHMIDT FREITAS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciências Biológicas / UNESP / Câmpus de Bauru - FC, Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

gov.br
Documento assinado digitalmente
FABIANA ALVES FIORE PINTO
Data: 05/12/2025 11:28:42-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Drª. FABIANA ALVES FIORE PINTO

RESUMO

Este trabalho avaliou a toxicidade de percolados provenientes da incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em obras geotécnicas, simulando cenários de exposição em condições reais de aplicação. Para isso, foram operados cinco reatores cilíndricos em escala laboratorial, utilizando lodo proveniente de uma Estação que emprega coagulante à base de alumínio. Na simulação foram avaliados cenários de referência: solo puro, lodo centrifugado e lodo seco naturalmente; e também cenários de misturas, característicos das obras geotécnicas na proporção de 50% de solo e 50% de lodo. As simulações foram operadas e monitoradas durante um ano para representar as condições climáticas secas e chuvosas, determinadas a partir de cálculos que consideraram dados reais de precipitação. A pesquisa analisou o percolado sem tratamento prévio, fornecendo dados sobre o que efetivamente atinge o meio aquático. Foram realizados bioensaios com a microalga *Raphidocelis subcapitata* e o quironomídeo *Chironomus sancticaroli*. Os resultados indicaram que os metais presentes no LETA são semelhantes aos encontrados naturalmente no solo, porém em concentrações superiores. Observou-se que a mistura solo-lodo atenuou a mobilidade de metais como Co, Mn, Mg, Pb e Fe, sugerindo um efeito positivo da matriz de solo na redução da carga lixiviada desses metais. Os ensaios ecotoxicológicos revelaram respostas contrastantes entre os organismos, evidenciando a importância da utilização de testes com organismos de diferentes níveis tróficos. Enquanto as simulações contendo lodo seco naturalmente promoveram uma inibição acentuada na divisão celular da microalga *R. subcapitata*, observou-se uma toxicidade atenuada para o quironomídeo *C. sancticaroli* neste mesmo cenário. Em contrapartida, o lodo centrifugado manifestou efeitos adversos severos para ambos os organismos. Embora a proporção (50:50) considerada para LETA tenha apresentado toxicidade específica para os bioindicadores testados, os resultados balizam os limites de segurança para o reaproveitamento deste resíduo, indicando que a viabilidade ambiental do reuso em obras geotécnicas está condicionada ao monitoramento ecotoxicológico e ao ajuste das dosagens de incorporação, em alinhamento aos preceitos da Economia Circular e dos ODS.

Palavras-chave: Lodo de Estação de Tratamento de Água, Obras Geotécnicas, Toxicidade, *Chironomus sancticaroli*, *Raphidocelis subcapitata*

ABSTRACT

This study evaluated the toxicity of leachate from the incorporation of Water Treatment Plant Sludge (WTPS) in geotechnical works, simulating exposure scenarios under real application conditions. To this end, five laboratory-scale cylindrical reactors were operated using sludge from a plant that employs an aluminum-based coagulant. The simulation evaluated reference scenarios: pure soil, centrifuged sludge, and naturally dried sludge; as well as mixture scenarios, characteristic of geotechnical works, in a proportion of 50% soil and 50% sludge. The simulations were operated and monitored for one year to represent dry and rainy climatic conditions, determined from calculations that considered real precipitation data. The research analyzed untreated leachate, providing data on what actually reaches the aquatic environment. Bioassays were performed with the microalga *Raphidocelis subcapitata* and the chironomid *Chironomus sancticaroli*. The results indicated that the metals present in WTPS are similar to those found naturally in soil, but in higher concentrations. It was observed that the soil-sludge mixture attenuated the mobility of metals such as Co, Mn, Mg, Pb, and Fe, suggesting a positive effect of the soil matrix in reducing the leached load of these metals. Ecotoxicological assays revealed contrasting responses among organisms, highlighting the importance of using tests with organisms from different trophic levels. While simulations containing naturally dried sludge promoted a marked inhibition of cell division in the microalga *R. subcapitata*, attenuated toxicity was observed for the *C. sancticaroli* in the same scenario. In contrast, centrifuged sludge showed severe adverse effects for both organisms. Although the ratio (50:50) considered for WTPS showed specific toxicity for the tested bioindicators, the results establish safety limits for the reuse of this residue, indicating that the environmental viability of reuse in geotechnical works is conditional on ecotoxicological monitoring and adjustment of incorporation dosages, in alignment with the principles of the Circular Economy and the SDGs.

Keywords: Water Treatment Plant Sludge, Geotechnical Works, Toxicity, Chironomid, Microalgae

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Microalga *Raphidocellis subcapitata*……...13
Figura 2 - *C. sancticaroli* em preparação para testes de laboratório……..14

PRIMEIRO ARTIGO

Figura 1 – Fluxograma das etapas de desenvolvimento experimental e análise de dados. A Fase 1 (Etapas Experimentais) abrange: (1) Preparação das amostras envolvendo centrifugação e secagem natural de lodo e solo; (2) Operação experimental com simulação de precipitação de 12 meses; e (3) Ensaios de materiais para análise de metais e avaliação ecotoxicológica. A Fase 2 (Análise de Dados) inclui: (4) Análise estatística comparativa com foco em períodos sazonais e métodos de secagem; e (5) Discussão dos resultados biológicos e químicos……19
Figura 2 – Esquema técnico da montagem experimental. Cinco reatores cilíndricos (80 cm de altura, 30 cm de diâmetro) foram montados em uma estrutura de suporte. Cada unidade continha uma camada de base de 5 cm de brita, uma camada de substrato de 35 cm (específica para cada tratamento) e uma camada superior de 2 cm de brita. As composições do substrato incluíram: solo puro (CS), lodo centrifugado (CC), lodo seco naturalmente (CSN) e misturas homogêneas (UBC e UBSN).....22
Figura 3 – Cronograma estratégico de amostragem para ensaios ecotoxicológicos com a microalga *R. subcapitata*. O diagrama ilustra a divisão do período experimental de 12 meses entre a estação chuvosa (meses 1, 2, 3, 10, 11 e 12; azul) e a estação seca (meses 4, 5, 6, 7, 8 e 9; amarelo). Os pontos de amostragem foram estrategicamente selecionados nos meses 3, 6, 9 e 12 para capturar a variabilidade sazonal e a estabilidade do sistema. Esta frequência trimestral foi definida com base na capacidade laboratorial e na necessidade de dados sazonais representativos para as análises subsequentes de metais e toxicidade……24
Figura 4 – Composição multielementar (mg/kg) das amostras de solo e de lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água). O eixo Y é apresentado em escala logarítmica para permitir a visualização simultânea de macroelementos (Al e Fe) e metais traço (ex: Cd e Ni). Os dados representam a caracterização inicial do Lodo Centrifugado (azul), Lodo Seco Naturalmente (verde) e Solo (vermelho) utilizados como substratos nos reatores experimentais……...26

Figura 5 – Caracterização elementar dos 9 parâmetros de metais analisados no solo e no lixiviado de lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água). Cada metal é apresentado com escalas independentes no eixo Y para garantir a visualização clara das diferenças de concentração entre as matrizes, abrangendo desde constituintes majoritários (Mn, Mg e Fe) até elementos traço (ex: Cd, Pb e Ni). Esta representação individualizada destaca a assinatura química específica de cada material e serve como linha de base para avaliar a mobilidade dos metais e a toxicidade potencial nos reatores simulados…….28

Figura 6 – Densidade algal observada nos diferentes reatores de acordo com os métodos de secagem do lodo de ETA. As barras representam os valores médios e as barras de erro indicam o desvio padrão. Os pontos de dados individuais (losangos) mostram a distribuição de todas as réplicas (N=24). A significância estatística foi confirmada pelo teste de Kruskal-Wallis (χ^2=120,p<0,001), com um tamanho de efeito forte (ε^2=0,839). Os colchetes indicam as comparações com p<0,001 ou ausência de significância (n.s., p>0,05) com base no teste *post-hoc* de DSCF…….35

Figura 7 – Variação sazonal da densidade algal ao longo dos períodos simulados. Os pontos de dados representam a densidade algal média para cada mês. O valor de p não significativo (p = 0,103, teste de Friedman) indica que a sazonalidade não exerceu influência decisiva no desempenho biológico do sistema. As anotações 'ns' (não significativo) indicam p > 0,05 para todas as comparações pareadas……..36

SEGUNDO ARTIGO

Figura 1 – Esquema técnico da montagem experimental. Cinco reatores cilíndricos de PVC (80 cm de altura, 30 cm de diâmetro). Cada unidade continha uma camada de base de 5 cm de brita, uma camada de substrato de 50 cm (específica para cada tratamento) e uma camada superior de 2 cm de brita……..48

Figura 2 – Fluxo de trabalho experimental para a avaliação da toxicidade aguda do lixiviado de solo-lodo utilizando larvas de *Chironomus sancticaroli* como bioindicadores…….50

Figura 3 – Valores de pH dos lixiviados gerados a partir de diferentes misturas de solo e tratamentos de lodo durante os meses chuvosos e secos. O "Controle" representa o cultivo sem a adição de lixiviado…….53

Figura 4 – Condutividade elétrica (µS/cm) do lixiviado em diferentes tratamentos. Variações significativas entre as estações chuvosa e seca indicam mudanças na concentração de íons dissolvidos…….55
Figura 5 – Concentrações de metais (mg/L) no lixiviado gerado a partir dos diferentes tratamentos de solo-lodo. Cada painel representa um elemento específico analisado durante os meses chuvosos (azul) e secos (laranja). Observe as escalas independentes no eixo Y para cada metal, devido às diferentes ordens de grandeza…….56
Figura 6 – Taxa de sobrevivência (%) de larvas de *Chironomus sancticaroli* após 96 horas de exposição aos lixiviados dos tratamentos com lodo centrifugado e seco naturalmente. As barras representam a sobrevivência média nas estações seca (laranja) e chuvosa (azul). A linha tracejada em 80% indica o limiar mínimo de sobrevivência para a validade do controle, de acordo com as diretrizes da OCDE 235…….58
Figura 7 – Mapa de calor (*heatmap*) da sobrevivência de *C. sancticaroli*……...59
Figura 8 – *Biplot* da Análise de Componentes Principais (PCA) integrando parâmetros físico-químicos, concentrações de metais e sobrevivência de *Chironomus sancticaroli*. Os dois primeiros componentes explicam 71,1% da variância total (PC1: 39,3%; PC2: 31,8%). Os vetores ilustram a correlação entre pH, Condutividade (Cond) e metais (Al, Mn, Ba) com a sobrevivência larval. As amostras são identificadas pelo tratamento (CS, CC, CSN, UBC, UBSN) e sazonalidade (R: Chuvoso; D: Seco).....60

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRO ARTIGO

Tabela 1 - Caracterização do solo…….21

Tabela 2 – Parâmetros analíticos, métodos e matrizes amostrais (lodo, solo e lixiviado) avaliados no estudo……22

Tabela 3 - Simulações avaliadas no estudo……..23

Tabela 4 - Volume de água destilada adicionada em cada reator……..24

Tabela 5 - Resultados de pH, Condutividade e Volume de água percolada em cada reator…….28

Tabela 6 - Concentrações máximas de metais e seus respectivos limites estabelecidos nas legislações……..32

Tabela 7 - Valores médios de densidade celular da *R. subcapitata* nos testes de toxicidade……34

SEGUNDO ARTIGO

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos, métodos analíticos e referências adotadas para a caracterização do lodo, solo e lixiviado gerado…….48

Tabela 2 – Simulações e descrição dos reatores avaliados no estudo……...49

Tabela 3 - Volume de água destilada adicionada em cada reator……..50

Tabela 4 - Resultados das análises de metal no solo e do lodo…….52

SUMÁRIO

1. Introdução……...12
2. Objetivos……16
3. Artigos
   3.1 Artigo 1 ……17
   3.1 Artigo 2 ……45
4. Conclusão……...68
5. Referências……69

1. INTRODUÇÃO

O processo atrelado à potabilização da água em Estações de Tratamento de Água (ETA) gera um subproduto denominado Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) (Seckler, 2017). A composição desse resíduo é variável e depende de fatores como a qualidade da água bruta, o tipo de coagulante utilizado, o método de desidratação aplicado e o ponto de coleta (Messa *et al*., 2025). A caracterização física do LETA é intrinsecamente dependente da etapa de processamento em que se encontra. Em seu estado bruto, o resíduo apresenta-se predominantemente líquido, com teores de umidade que excedem 90% (Richter, 2009; Souza *et al*., 2024). Todavia, para fins de reaproveitamento ou descarte, processos de desidratação são aplicados, alterando a proporção de umidade (Silva *et al.*, 2025).

Pesquisas reportam haver grandes quantidades de LETA geradas no mundo, mas não apresentam os cálculos atrelados aos valores (Krause &73 Bronstein, 2024). Atualmente, a China figura como a maior geradora mundial, com 90,2 Mt/ano, seguida pelos Estados Unidos (28,6 Mt/ano) e por Alemanha e Japão (6,2 Mt/ano) (Ren *et al*., 2021). No Brasil, embora a geração de lodo seja estimada em 1,5% do volume de água tratada (Fiore *et al*., 2020), não há dados exatos sobre a produção total (SNAS, 2022), o que dificulta o gerenciamento e a fiscalização do seu descarte.

As práticas de gerenciamento do LETA são essenciais para entender os impactos ambientais do reuso ou descarte do material. A prática mais comum é a disposição final do LETA em aterros sanitários ou lançamento direto no corpo d'água (Nair & Ahammed, 2015). Essa última prática é realizada inadequadamente, pois em geral as regulamentações ambientais a coíbem, pois há evidências que mostram deterioração da qualidade das águas dos corpos receptores (Rodgher *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2024; Batista *et al.*, 2021). De acordo com Fiore *et al.* (2022) a disposição de LETAs em aterros sanitários figura legalmente como a opção ambientalmente adequada, mas poucos estudos avaliaram os impactos dessa aplicação. Mesmo para os casos de disposição em aterros, a remoção da umidade dos LETAs, em geral, ocorre com vistas a economia de custos (Silva *et al*., 2025).

Estudos na literatura demonstram impactos positivos na adoção de medidas para o reaproveitamento do lodo em incorporações com solos, tais como: aplicação em camadas de

pavimento (Takao *et al*., 2024), como um elemento geotécnico aplicado em aterros sanitários (Boscov. *et al.*, 2021) e na aplicação como base ou sub-base do pavimento em construções de estrada (Nazir *et al.*, 2020; Fiore *et al.*, 2022); cobertura de aterros sanitários em substituição a solos naturais (Tsugawa & Boscov, 2023), base para componentes de geopolímeros (Ferone *et al.*, 2021) etc.

No Brasil, o LETA é considerado um resíduo não perigoso e isenta a necessidade prévia de testes de toxicidade antes do descarte ou reaproveitamento do material (ABNT, 2024). Contudo, alguns metais como Ba, Cd, Pb e Mn já foram encontrados na composição deste resíduo (Fiore *et al*., 2020) que podem conferir toxicidade ao LETA a depender da concentração. No geral, estudos que avaliam a toxicidade do LETA associam este efeito com a presença de metais na composição, tais como: Al, Ba, Fe, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd e As (Cardoso *et al*., 2019; Hidalgo *et al*., 2017).

Além disso, alguns impactos ambientais causados pela aplicação do LETA em solos já foram estudados, tais como assimilação de Fe e Al por organismos bioindicadores (Howells *et al.*, 2018), diminuição da concentração de N, P, K, Ca e Mg em plantas (Figueiredo Neto, 2011) e limitações nos efeitos dos fertilizantes em plantas (Zhao *et al.*, 2018).

A depender do método de secagem aplicado ao LETA, o resíduo terá propriedades distintas (Ospanov *et al.*, 2024; Azeddine *et al.*, 2022). A secagem em baixas temperaturas diminui a umidade do resíduo, aumenta a concentração de substâncias voláteis e de sólidos totais (Buselato *et al.*, 2019). Quando submetidos à secagem térmica, a concentração de substâncias presentes no LETA aumenta, como por exemplo a concentração de metais (Fiore *et al.*, 2024) e pode alterar propriedades microbiológicas (Silva *et al*., 2024).

Para que a disposição final do LETA seja realizada de forma ambientalmente segura, é essencial que caracterizações químicas estejam aliadas às análises ecotoxicológicas (Rodgher *et al*., 2023), pois esse resíduo pode acarretar efeitos na coluna d'água e no sedimento (Batista et al., 2021), como aumento da quantidade e diversidade de organismos patogênicos, incremento de metais no sedimento e na coluna d'água (Di Bernardo, 2017; Ouf *et al.*, 2018).

Alguns estudos que discutem a ecotoxicidade do LETA para espécies aquáticas utilizam algas, tais como a espécie *Raphidocelis subcapitata,* do filo Chlorophyta (alga verde) (George *et al.*, 1995) e espécies do gênero *Chironomus (C. xanthus* e *C. tentans*) (Sotero-Santos *et al.*, 2007;

Zhou *et al*., 2021), além de outros organismos representativos como bactérias, zooplânctons e peixes (Bernegossi *et al*., 2022) como organismos-teste.

A seleção do organismo-teste a ser utilizado nos estudos ecotoxicológicos considera critérios como: sensibilidade dos indivíduos a uma variedade de agentes químicos; reprodução, ciclo de vida e o tamanho (Domingues & Bertoletti, 2006; Zagatto & Bertoletti, 2015). Além disso, utiliza-se mais de uma espécie para alcançar resultados mais precisos dos efeitos tóxicos e aumentar a probabilidade de respostas em organismos que apresentam sensibilidades diferentes ao mesmo agente químico (Knie & Lopes, 2004).

Entre as diferentes espécies de microalgas, *R. subcapitata* (Figura 1) é frequentemente utilizada como organismo-teste em ambientes águas doce, por possuir metodologias padronizadas (ABNT, 2023; OECD, 2011; USEPA, 2012) e devido à sua representatividade na cadeia trófica (Chapman, 2010), além da praticidade de manutenção em laboratório, ciclo de vida curto e sensibilidade a poluentes, tais como metais (Alho *et al.*, 2020; Gebara *et al.*, 2023; Sohn *et al.*, 2015).

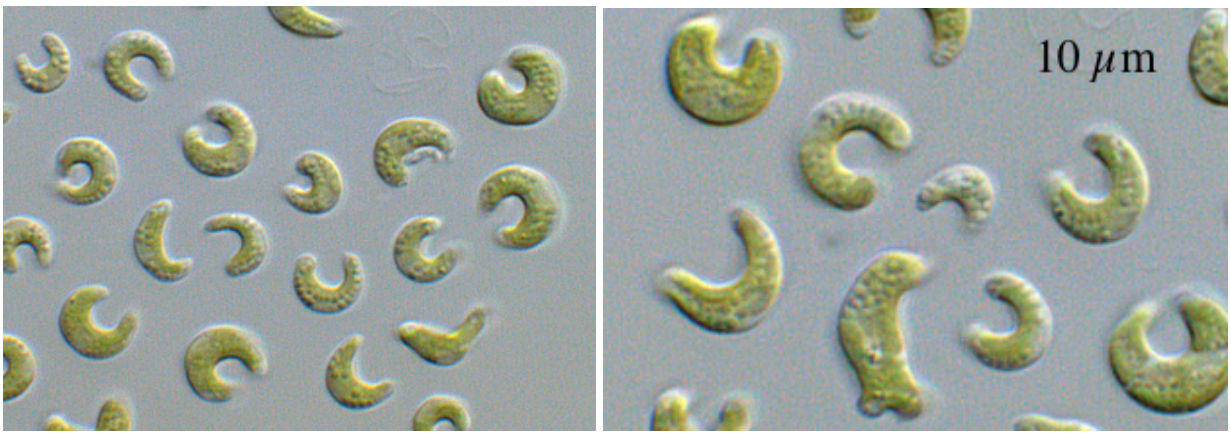


Figura 1. Microalga *Raphidocellis subcapitata*
Fonte: Culture Collection of algae & protozoa (s.d.)

Já os organismos bentônicos da espécie *Chironomus* são utilizados para avaliar o sedimento e águas intersticiais, pois estão com contato direto com essas regiões, são abundantes no ecossistema, possuem ciclo de vida curto, fase larval próxima ao sedimento e fase adulta no ambiente terrestre (Brovini *et al.*, 2023). O inseto *Chironomus sancticaroli* (Figura 2) destaca-se em estudos ecotoxicológicos de regiões tropicais (Richardi *et al.*, 2015), e as metodologias para

testes com este organismo são baseadas em protocolos robustos de ecotoxicologia (Dornfeld *et al.*, 2018; Corbi *et al.*, 2019; Brovini *et al*., 2023).

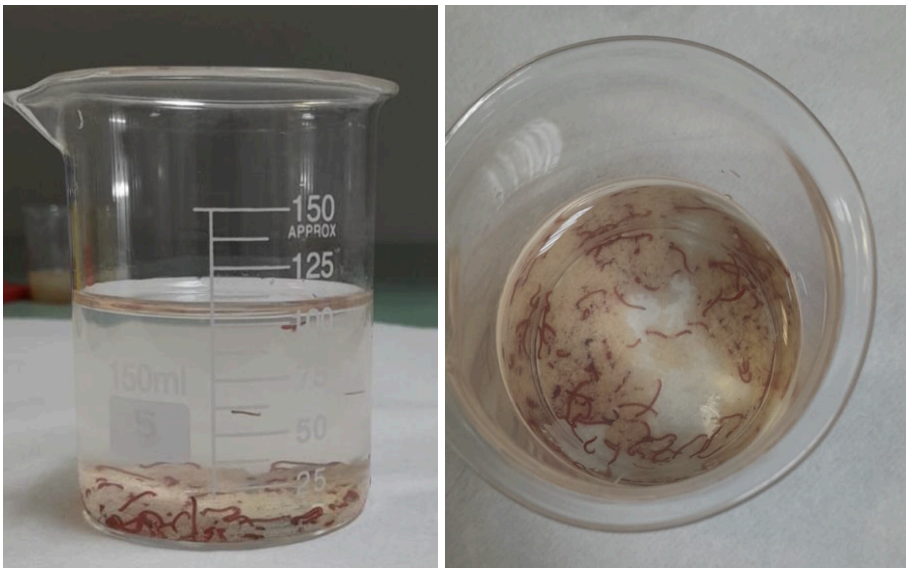


Figura 2. *C. sancticaroli* em preparação para testes de laboratório

Fonte: a autora

No geral, trabalhos que avaliam a toxicidade de lodo, utilizam extratos lixiviados como amostras para os testes (Fiore *et al*., 2022; Agarwal & Singh, 2023), o que pode ser justificado devido às instruções normativas vigentes (ABNT, 2024; CEN, 2002; USEPA, 1992). Cabe destacar, todavia, que os extratos lixiviados não representam as condições reais de aplicação dos LETAs em solos sujeitos às intempéries (Rodgher *et al*., 2023).

Dessa forma, nota-se que são escassos os estudos que avaliam os efeitos reais da toxicidade de percolados de obras geotécnicas, e que possam subsidiar medidas de segurança ambiental para o reaproveitamento deste resíduo. Ressalta-se que a maioria das pesquisas também não evidenciam a influência da sazonalidade entre períodos e a existência de efeitos comparativos entre métodos de desidratação do lodo.

Cabe destacar que as aplicações de LETAs em solos já é legalmente permitida no Rio Grande do Sul (Brasil), condicionada ao atendimento de características específicas da composição dos resíduos (CONSEMA, 2022). Essa prática é incentivada por políticas sustentáveis, pois pode gerar valor agregado ao LETA. Porém, devido às especificidades da água bruta e do tratamento aplicado resíduo, torna-se indispensável a realização de ensaios

ecotoxicológicos que abranjam diferentes níveis tróficos e nichos ecológicos, como a coluna d'água e o sedimento, para garantir a segurança ambiental desses reaproveitamentos (Bernegossi *et al*., 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar a toxicidade de percolados oriundos da destinação de LETAs em simulações de obras geotécnicas para duas espécies de organismos aquáticos.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar a toxicidade do percolado proveniente da simulação de obras geotécnicas como destinação final de LETAs para microalga *Raphidocelis subcapitata* e para o organismo bentônico tropical *Chironomus sancticaroli*;
- Avaliar a influência da sazonalidade na toxicidade para estes organismos;
- Avaliar a influência do método de secagem aplicado ao LETA na toxicidade para estes organismos.

4. CONCLUSÃO

Os resultados confirmam a eficácia dos ensaios de ecotoxicidade na avaliação do uso benéfico do Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) em aplicações geotécnicas. A sensibilidade diferenciada entre os organismos evidenciou que tratamento prévio aplicado ao lodo é o fator determinante da toxicidade: enquanto o lodo centrifugado apresentou maior agressividade para ambos os organismos, o lodo seco naturalmente favoreceu a sobrevivência de *C. sancticaroli*.

As diferenças biológicas observadas — inibição de divisão celular na microalga *R. subcapitata* e mortalidade na larva *C. sancticaroli* — reforçam a necessidade de testes multitróficos. A toxicidade mais acentuada no lodo centrifugado pode estar relacionada à maior mobilidade de metais detectados, embora o solo também apresentasse os mesmos metais detectados no lodo.

Quanto à sazonalidade, a ausência de variações estatísticas significativas para *R. subcapitata* foi acompanhada por uma resposta similarmente estável em *C. sancticaroli*. Embora os lixiviados de períodos chuvosos (lodo seco naturalmente) tenham apresentado uma leve oscilação na sobrevivência (88% a 100%), essa variabilidade não se mostrou estatisticamente determinante. Tais achados sugerem que, para as condições testadas, a dinâmica de lixiviação em climas tropicais exerce uma influência secundária na toxicidade aguda.

O estudo restringiu-se a efeitos agudos e ao uso de materiais isolados ou em proporções médias de misturas. Portanto, recomendam-se ensaios de toxicidade crônica para avaliar efeitos subletais e persistentes a longo prazo e testes com proporções reduzidas de lodo misturado ao solo, simulando aplicações geotécnicas reais para identificar o "limiar de segurança" ambiental.

5. REFERÊNCIAS

AGARWAL S; SINGH, A.P. Assessment of Toxicity Characteristics in Leachate from the Textile Industry–Based Sludge Using Leachate Pollution Index. 2023. *Water Air Soil Pollut*. https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11270-023-06785-9

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 10004:2024. Resíduos Sólidos. 2024. Rio de Janeiro.

ABNT. NBR 12648:2023. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaios com algas da classe *Chlorophyceae*. Rio de Janeiro, 2023

ALHO, L. O. G.; Souza, J. P. *et al.* Photosynthetic, morphological and biochemical biomarkers as tools to investigate copper oxide nanoparticle toxicity to a freshwater *Chlorophyceae*. 2020. *Environ. Pollut.* https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114856

AZEDDINE, F., EL KHADIR, L. et al. Thermodynamic analysis and mathematic modeling of wastes sludge from drinking water treatment plants. (2022). J. Eco. Eng. https://doi.org/10.12911/22998993/144421.

BATISTA, I. F; MICHELAN, D. C. G. S. *et al.* 2021. Potential contribution of water treatment plant (WTP) sludge to river pollution. *Scientia Plena*. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.101701

BERNEGOSSI, A. C.; FREITAS, B. L. S. *et al*. A systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges. 2022. *J. Environ. Sci. Health*. https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2060021

BROVINI, E. M.; LOBO, H. *et al*. *Chironomus sancticaroli* (Diptera: *Chironomidae*) in ecotoxicology: laboratory cultures and tests. 2023. *Ecotoxicology*. https://doi-org.ez87.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10646-023-02631-0

BOSCOV, M. E. G.; TSUGAWA, J. K. *et al*. Beneficial use of Water Treatment Sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. 2021. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su13179848

BUSELATTO, D. M.; WENZEL, M. C. *et al*. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. 2019. *Materia (Rio de Janeiro)*. https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0645

CARDOSO, C.M.M.; ZAVARIZE, D.G. et al. (2019). Evaluating adsorbent properties of drinking water treatment plant sludge-based carbons activated by K_2CO_3/CH_3COOH: a low-cost material for metal ion remediation. *Appl. Sci*. https://doi.org/10.1007/s42452-019-0709-8.

CHAPMAN, R. L. Algae: the world's most important "plants" - an introduction. 2013. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. https://doi.org/10.1007/s11027-010-9255-9

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente. (2022). Resolução CONSEMA nº 461, de 22 de novembro de 2022. Define critérios e procedimentos para o uso de lodos gerados em estações de tratamento de água (LETAs) e seus produtos derivados em solos, e dá outras providências

CORBI, J.J.; BERNEGOSSI, A. C. *et al*.; *Chironomus sancticaroli* (Diptera Chironomidae) as a sensitive test species: can We rely on its use after repeated generations, under laboratory conditions?. 2019. *Bull Environ Contam Toxicol*. https://doi.org/10.1007/s00128-019-02644-8

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. *et al.* Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2017. 3ªed. LDiBe. São Paulo. Brasil.

DOMINGUES, D.F.; BERTOLETTI, E. Seleção, Manutenção e Cultivo de Organismos Aquáticos. In: ZAGATTO, P.A.; BERTOLETTI, E. 2006. Ecotoxicologia Aquática: Princípios e Aplicações. São Carlos: Ed. Rima. p. 153-184.

DORNFELD, C. B.; RODGHER, S. *et al*. *Chironomus sancticarolii* (Diptera, Chironomidae) as a sensitive tropical tedt species in laboratory bioassays evaluating metals (copper and cadmium) and field testing. 2018. *Arch Environ Contam Toxicol*. https://doi.org/10.1007/s00244-018-0575-1

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION - CEN. (2002). *EN 12457-4: Characterisation of waste — Leaching — Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges — Part 4: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 L/kg for materials with particle size below 10 mm (without or with size reduction)*. Brussels: CEN.

FERONE, C.; CAPASSO, I. *et al*. Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. 2019. *J. Clean Prod.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.299

FIGUEIREDO NETO, A. Utilização de Lodo de Estação de Tratamento de Água na produção de mudas de árvores com ocorrência no Cerrado. 2011.

FIORE, F.; RODGHER, S. *et al*. Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. 2020. *Rev. Ambiente Água.* https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565

FIORE, F.; RODGHER, S. *et al.* Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: experimental study. 2022. *Clean. Eng. Technol.* https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512

FIORE, F.; JESUS, A. M. D. et al. Análise das potenciais alterações nas propriedades químicas dos Lodos de Estação de Tratamento de Água em decorrência de diferentes condições de secagem. 2024. XXXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

GEBARA, R.C; DE OLIVEIRA, L. *et al*. Single and combined effects of Zn and Al on photosystem II of the green microalgae *Raphidocelis subcapitata* assessed by pulse-amplitude modulated (PAM) fluotometry. 2023. *Aquat Toxicol*. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106369

GEORGE, D.B.; BERK, S.G. *et al.* Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protoxoan, fish and marine bacterium. 1995. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* https://doi.org/10.1007/BF00212964

HIDALGO, A. M.; MURCIA, M. D. *et al.* Possible uses for sludge from drinking water treatment plants. 2017. *J. Environ. Eng.* https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001176

HOWELLS, A. P.; LEWIS, S. J. *et al.* Water treatment residuals as soil amendments: Examining element extractability, soil porewater concentrations and effects on earthworm behavior and survival. 2018. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.087

KRAUSE, M. J.; BRONSTEIN, K. E. Estimating national sludge generation and disposal from US drinking water and wastewater treatment plants. 2024. *J. Clean Prod.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142121

MESSA, G. N.; JESUS, A. M. D. *et al*. Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource: Potential and limitations. 2025. *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247

NAIR, A. T. & AHHAMMED, M.M. The reuse of water treatment sludge as a coagulant for pos-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. 2015. *J. Clean Prod.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037

NAZIR, A. K.; MAHMOUD, E. *et al.* Safe and economic disposal of water treatment residuals by reusing It as a substitution layer in roads construction (spectroscopic and geotechnical study). 2020. *Environ Sci Pollut Res Int.* https://doi.org/10.1007/s11356-020-09371-2

KNIE, J. L. W.; LOPES, E. W. B. Testes ecotoxicológicos: métodos, técnicas e aplicações. Florianópolis: FATMA: GTZ, 2004. 289 p. il. color.

OECD. Test No. 201: Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, 2011; Section 2, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/9789264069923-en.

OSPANOV, K.; KULDEYEV, E. et al. Pilot study on the possibility of improving water treatment sludge management in Almaty. 2024. *Water*. https://doi.org/10.3390/w16192849

OUF, S. A.; YEHIA, R. S. *et al.* Bacterial contamination and health risks of drinking water from the municipal non-government managed water treatment plants. 2018. *Environ Monit Assess*. https://doi.org/10.1007/s10661-018-7054-z

REN, B.; ZHAO, Y. *et al.* Granulation of Drinking Water Treatment Residues: Recent advances and propects. 2020. *Water*. https://doi.org/10.3390/w12051400

RICHARDI, V. S.; VICENTINI, M. *et al.* Morpho-histological characterization of immature of the bioindicator midge *Chironomus sancticaroli* Strixino and Strixino (Diptera, Chironomidae). 2015. *Rev Bras Entomol.* https://doi.org/10.1016/j.rbe.2015.07.003

RICHTER, C. A. Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento. 2009. São Paulo: Editora Blucher. E-book.p.92. ISBN 9788521217244.

RODGHER, S.; FIORE, F.A. *et al.* Acute toxicity of leachates from Water treatment Plants Sludge and Combinations with Soils from a Tropical Region. 2023. *Water Air Soil Pollut*. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06080-7

SECKLER, S. Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento. 2017. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017. E-book. p.14. ISBN 9788595153851.

SILVA, J.; CARVALHO, M. H. et al. Effect of the thermal drying on the physico-chemical and microbiological characteristics of drinking water treatment sludge. 2025. *Clean. Eng. Technol.* https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100947

SNAS - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades. Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto: Visão Geral - ano de referência 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em 15 de fevereiro de 2025

SOHN, E. K.; CHUNG, Y. S. *et al.* Acute toxicity comparison of single-walled carbon nanotubes in various freshwater organisms. 2015. *Biomed Res Int*. https://doi.org/10.1155/2015/323090

SOTERO-SANTOS, R. B.; ROCHA, O. *et al.* Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms. 2007. *Chemosphere*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.049

SOUZA, A. C. Z.; SANTOS, J. E. *et al.* Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges. 2024. *Int J Sci Environ Technol*. https://doi.org/10.1007/s13762-023-05338-1

TAKAO, T. W.; BARDINI, V. S. *et al*. Beneficial use of water treatment sludge with stabilizers for application in road pavements. 2024. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su16135333

TSUGAWA, J.K; BOSCOV, M. E. G. Potencial use of drinking water treatment sludge mixed with additives in landfills covers or other low solicitation applications, 2023. *In: International Congress on Environmental Geotechnics*. https://doi.org/10.53243/ICEG2023-234

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (1992). Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). In Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846). Washington, D.C.: USEPA.

U.S. EPA. Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report: Summary of residuals generation, treatment, and disposal at large community water systems. 2011.

U.S. EPA. Series 850 - Ecological effects test guidelines - 850.4500: Algal toxicity. 2012.

ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. Ecotoxicologia aquática: Princípios e Aplicações. 2015. 2a Ed.

ZHAO, Y.; LIU, R. *et al*. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals - An explicit and comprehensive review. 2018. *Chem. Eng. J.* https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143

ZHOU, L.; WALLACE, S. M. *et al*. Acute and Chronic toxicity testing of drinking water treatment residuals in freshwater systems. 2021. *Environ. Toxicol. Chem*. https://doi.org/10.1002/etc.5061