

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS FRANCISCO BELTRÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL: ANÁLISE E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

DANIELA FATIMA TAMANKIEVIES

**DESTINAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: AVANÇOS TEÓRICOS E
EXPERIMENTAIS**

**FRANCISCO BELTRÃO - PR
2025**

DANIELA FATIMA TAMANKIEVIES

**DESTINAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: AVANÇOS TEÓRICOS E
EXPERIMENTAIS**

**Disposal of Water Treatment Plant Sludge in Wastewater Treatment Plants:
Theoretical and Experimental Advances**

Trabalho de conclusão de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre Programa e Tecnologia Ambiental como requisito parcial à defesa do curso de mestrado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bortoli
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ticiane Sauer Pokrywiecki

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão



DANIELA FATIMA TAMANKIEVIES

DESTINAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS: AVANÇOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental: Análise E Tecnologia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Meio Ambiente.

Data de aprovação: 27 de Março de 2025

Dr. Marcelo Bortoli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Aline Schuck, Doutorado - Universidade do Contestado (Unc)

Dra. Thalita Grandó Rauen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Ticiane Sauer Pokrywiecki, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/03/2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e às Nossas Senhoras de Fátima, Aparecida e Caravaggio, por me concederem força e coragem nos momentos mais difíceis. A fé e as orações foram fundamentais para que eu mantivesse o foco e a perseverança nesta caminhada.

À minha família, expresso minha profunda gratidão. Ao meu esposo, Claudir, por sempre acreditar em mim, me apoiar e me incentivar incondicionalmente, e ao meu filho, Vinicius, por compreender minha ausência em tantos momentos. Obrigada por tudo! Amo vocês. À minha mãe e aos meus irmãos, meu carinho e agradecimento.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, Anna Karolina, Daniela Caroline, André, Bruno, Kaylana, Marielly, Diego, Luciano e Diane, minha sincera gratidão pela ajuda, pelas conversas e pelos conselhos que tanto enriqueceram minha trajetória de pesquisadora.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Bortoli, minha eterna gratidão por todo o esforço, paciência e dedicação ao me apoiar na realização deste trabalho. Sua orientação foi essencial nos momentos mais desafiadores, e sou muito grata pelo tempo e atenção dedicados. À minha coorientadora, Profa. Dra. Ticiane Sauer Pokrywiecki, agradeço pelo apoio e incentivo ao longo desta jornada.

À Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (Casan), minha gratidão pela parceria na execução das análises da pesquisa e pela liberação para frequentar as aulas, o que foi indispensável para a realização desta pesquisa.

Também aos professores e colaboradores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Francisco Beltrão, em especial do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), por sempre terem prestado apoio quando necessitei e ao Laboratório Multiuso (LABANA) pela disponibilização dos equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta pesquisa se tornasse realidade. A todos, meu muito obrigado!

RESUMO

O lodo gerado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) representa um desafio ambiental enorme, mas também oferece oportunidades para aplicações sustentáveis em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Este estudo investigou, de forma cienciométrica e experimental, e a destinação do lodo de ETA em tratamento de esgotos. A análise cienciométrica foi conduzida com 198 estudos selecionados de 544 artigos identificados nas bases Scopus, Web of Science e Science Direct, revelando crescimento de publicações desde 2015 e destacando lacunas sobre toxicidade, remoção de hormônios e destinação de lodo de ETA em ETE. Ensaio de mistura avaliaram a eficiência da combinação do lodo de ETA com esgoto bruto sob diferentes condições de dosagem e tempos de sedimentação. Os resultados demonstraram que a eficiência de remoção de alumínio, fósforo total e sólidos totais atingiu valores superiores a 95%, indicando que o lodo de ETA pode substituir coagulantes comerciais e reduzir custos operacionais. Ensaio ecotoxicológicos realizados com *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* indicaram baixa toxicidade para a maioria das condições operacionais, com valores de CE50 superiores a 80% na maioria dos experimentos. Os achados reforçam o potencial do lodo de ETA como auxiliar na coagulação e floculação em estações de tratamento de esgoto, contribuindo para a economia circular e a gestão sustentável de resíduos. Pesquisas futuras devem explorar aplicações em larga escala, impactos de longo prazo e a remoção de contaminantes emergentes para consolidar esta abordagem como alternativa ambientalmente segura.

Palavras-chave: lodo de tratamento de água; reúso; ecotoxicidade; bioindicadores; mapeamento científico.

ABSTRACT

The sludge generated in Water Treatment Plants (WTPs) poses a significant environmental challenge but also offers opportunities for sustainable applications in Wastewater Treatment Plants (WWTPs). Through scientometric and experimental approaches, this study investigated the destination of WTP sludge in sewage treatment. The scientometric analysis included 198 selected studies out of 544 articles from the Scopus, Web of Science, and Science Direct databases. The results indicated a growing number of publications since 2015 and revealed research gaps related to toxicity, hormone removal, and the use of WTP sludge in WWTPs. Mixing tests assessed the efficiency of combining WTP sludge with raw sewage under different dosage conditions and sedimentation times. The results showed removal efficiencies of aluminum, total phosphorus, and total solids above 95%, suggesting that WTP sludge can replace commercial coagulants and reduce operational costs. Ecotoxicological assays using *Daphnia magna* and *Vibrio fischeri* showed low toxicity under most operational conditions, with EC50 values above 80% in most tests. The findings highlight the potential of WTP sludge as a coagulant aid in wastewater treatment, contributing to circular economy initiatives and sustainable waste management. Future research should focus on large-scale applications, long-term impacts, and the removal of emerging contaminants to consolidate this approach as an environmentally safe alternative.

Keywords: water treatment sludge; reuse; ecotoxicity; bioindicators; science mapping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais autores do portfólio.....	19
Figura 2 - Principais palavras-chave do portfólio.....	19
Figura 3 - Distribuição geográfica das publicações relacionadas ao lodo da ETA. ...	21
Figura 4 - Principais Revistas que foram publicados os artigos.	22
Figura 5 - Divisão dos artigos por tema.....	23
Figura 6 - Número anual e tendências de publicações de 1989 ao ano 2024 (agosto).	24
Fotografia 1 - Jar teste sendo realizado em diferentes concentrações de lodo.	32
Fotografia 2 - Frascos contendo as amostras de sobrenadante coletadas após os testes, prontas para envio aos laboratórios para análise.	33
Fotografia 3 - Jar teste sendo realizado em diferentes concentrações de lodo na etapa da sedimentação.	37
Gráfico 1 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio, e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo ETA 3%.	38
Gráfico 2 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo de ETA 8%.	39
Gráfico 3 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo de ETA 13%.	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Busca final nas bases de dados.....	17
Quadro 2 - Procedimentos de filtragem.....	17
Quadro 3 - Publicações com mais citações do portfólio.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da ETA e da ETE.....	30
Tabela 2 - Parâmetros analisados para caracterização do lodo de ETA e do esgoto bruto.	31
Tabela 3 - Concentrações de lodo e tempos de sedimentação utilizados nos ensaios.	32
Tabela 4 - Variáveis da estatística.	34
Tabela 5 - Caracterização do Lodo de ETA e do Esgoto Bruto.....	35
Tabela 6 - Resultados dos Ensaio de Mistura.	37
Tabela 7 - Resultados de Toxicidade Aguda de <i>Daphnia Magna</i> e <i>Vibrio Fischeri</i> ...42	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CE20	Concentração Efetiva 20%
CE50	Concentração Efetiva 50%
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMA	Instituto do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	11
CAPÍTULO 2 - REAPROVEITAMENTO E IMPACTOS DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM UM PANORAMA CIENCIOMÉTRICO	14
2.1 Introdução	14
2.2 Metodologia	15
2.3 Resultados e Discussão	18
2.3.1 Análises da Palavras Chaves e Autores	18
2.3.2 Países e Instituições Produtivas	20
2.3.2 Produção Científica ao Longo Do Tempo	22
2.4 Considerações Finais	27
CAPÍTULO 3 - DESTINAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO COM AVALIAÇÃO DE TOXICIDADE	28
3.1 Introdução	28
3.2 Metodologia	30
3.2.1 Descrição da Área De Estudo	30
3.2.2 Coleta de Amostras	30
3.2.3 Caracterização Físico- Química	30
3.2.4 Experimentos com Lodo de Eta (Jar Teste)	31
3.2.5 Ensaio Ecotoxicológicos	33
3.2.6 Análises Estatísticas	34
3.3 Resultados e Discussão	35
3.3.1 Caracterização Físico- Química	35
3.3.2 Eficiência dos Ensaio De Mistura	36
3.3.3 Análise de Resultados	37
3.3.4 Avaliação da Ecotoxicidade	41
3.4 Considerações Finais	43
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL	45
REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE A - Portfólio de Artigos	53

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

O tratamento de água potável é importante para remover impurezas e posteriormente ser destinado ao abastecimento humano, garantindo que a água atenda aos padrões físico-químicos estabelecidos para consumo seguro (Organização Mundial da Saúde, 2017). Mas, a geração de subprodutos durante esse processo, como o lodo proveniente de Estações de Tratamento de Água (ETA), apresenta grandes desafios ambientais, quando relacionando a sua destinação. Estima-se que as ETAs convencionais produzem milhares de toneladas de lodo anualmente (Zainol *et al.*, 2022), composto por hidróxidos de alumínio e ferro, matéria orgânica e partículas suspensas (Abdelrahman *et al.*, 2023).

Nos países desenvolvidos, há políticas rigorosas, como a Diretiva (UE) 2018/850, que incentivam práticas alinhadas à economia circular, promovendo a recuperação e o reaproveitamento de resíduos. Em contraste, no Brasil, as práticas de destinação inadequadas ainda predominam. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2017), 56% dos resíduos gerados em ETAs são lançados diretamente em corpos d'água, 13% são descartados em terrenos ou lixões, 12% seguem para aterros sanitários e apenas 7% são reaproveitados. Esse cenário evidencia lacunas importantes na gestão sustentável desses resíduos, reforçando a necessidade de alternativas técnicas e sejam ambientalmente viáveis.

Ao longo das últimas décadas, estudos sobre o lodo de ETA evoluíram de uma ênfase inicial na disposição final em solos (HeilBarbarick, 1989; Elliott; Dempsey; Maille, 1990) para investigações sobre diversas possibilidades de reaproveitamento. Entre essas aplicações destacam-se o uso do lodo como adsorvente (Yildiz; Sevinç, 2018), a recuperação de coagulantes (Ramadan; Sayed; Aziz, 2020), a fabricação de materiais de construção (Carvalho Gomes *et al.*, 2019; Sheng *et al.*, 2021) e sua aplicação em sistemas de tratamento de esgoto (Mora-León *et al.*, 2022). Essas abordagens ilustram o potencial do lodo de ETA para integrar soluções sustentáveis e promover a economia circular.

Pesquisas recentes destacam as propriedades físico-químicas do lodo de ETA, como sua capacidade de adsorção e a presença de compostos inorgânicos, que favorecem seu uso em diferentes contextos (Fantasia; Lakhali; Idlimam, 2022). Ainda, o reaproveitamento de coagulantes extraídos do lodo mostra-se promissor para o

tratamento de águas residuais, alinhando-se aos princípios da economia circular (Bougrine *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços, permanecem lacunas importantes no conhecimento sobre o uso do lodo de ETA. Estudos ainda não abordaram de forma suficiente os impactos de longo prazo da aplicação do lodo em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), especialmente em relação à toxicidade e às condições operacionais ideais (Li *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2022). As revisões cienciométricas abrangentes também são raras, dificultando a identificação de tendências e prioridades de pesquisa. Essas lacunas reforçam a necessidade de estudos que avaliem a interação entre parâmetros operacionais e toxicidade, além dos benefícios e limitações dessa prática. A seleção e análise do portfólio de artigos ordenados por relevância científica fornecerão as bases teóricas e técnicas para o desenvolvimento dos experimentos propostos, além de contribuir para o avanço do conhecimento no tema.

A cienciométrica tem se mostrado uma ferramenta importante para mapear tendências de pesquisa, identificar lacunas de conhecimento e orientar decisões futuras em campos emergentes. Este estudo teve como objetivo explorar o estado da arte no reaproveitamento do lodo de ETA. Palavras-chave previamente selecionadas e que garante uma análise abrangente, foram delimitadas nos tópicos-chave como lodo de tratamento de água, toxicidade, bioindicadores, coagulantes, hormônios, adsorção, e estações de tratamento de esgoto. A pesquisa iniciou com uma revisão cienciométrica que sintetizou os avanços e destacou lacunas no conhecimento sobre o tema.

Destaque-se também que está pesquisa alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o ODS 6 (Água Limpa e Saneamento), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 14 (Proteger a Vida Marinha), ao propor práticas que integrem sustentabilidade e eficiência operacional. Além disso, utiliza bioindicadores, como *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*, amplamente reconhecidos por sua sensibilidade na avaliação da toxicidade de efluentes. Esse enfoque possibilita uma análise detalhada dos efeitos ecotoxicológicos do lodo de ETA em diferentes condições de operação.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo principal avaliar a toxicidade do lodo de ETA e analisar fatores como dosagem e tempo de sedimentação, considerando seus impactos nos parâmetros operacionais do

tratamento primário em ETEs. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliométrica para mapear o estado da arte sobre o reaproveitamento do lodo de ETA, fornecendo suporte para a definição dos experimentos laboratoriais. Com base nessas informações, foram conduzidos testes ecotoxicológicos e análises físico-químicas, a fim de avaliar a influência das variáveis operacionais na eficiência do processo.

Para compreender melhor a construção da pesquisa esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral sobre o tema, contextualizando a pesquisa e seus objetivos. O Capítulo 2 traz uma análise bibliométrica abrangente, mapeando o panorama global das pesquisas sobre o reaproveitamento do lodo de ETA. O Capítulo 3 detalha a parte experimental da pesquisa, explorando o uso do lodo de ETA no tratamento de esgoto sanitário, com avaliação da toxicidade e do potencial de recuperação de recursos, baseada em bioindicadores e análises físico-químicas. O Capítulo 4 reúne as principais conclusões do trabalho, destacando suas implicações científicas e práticas, além de apresentar recomendações para futuras pesquisas e aplicações em escala industrial. Por fim, o Capítulo 5 lista todas as referências utilizadas na dissertação e nos artigos.

CAPÍTULO 2 - REAPROVEITAMENTO E IMPACTOS DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM UM PANORAMA CIENCIOMÉTRICO

2.1 Introdução

Os subprodutos do tratamento de água potável representam uma questão ambiental de relevância, pois as ETAs convencionais produzem anualmente milhares de toneladas de lodo (Zainol *et al.*, 2022). Essa prática é inviável ambiental e economicamente, como apontado por Reis *et al.* (2024). O gerenciamento adequado do lodo proveniente da ETA é de interesse global, impulsionado pelo crescimento populacional e pela crescente demanda por água potável (Ahmad *et al.*, 2017). Estudos anteriores destacam a importância do uso de lodo de tratamento de água potável para promover a economia circular, especialmente devido às suas múltiplas propriedades adsorventes (Yildiz; Sevinç, 2018; Bougrine *et al.*, 2024).

A literatura científica apresenta diversos estudos importantes sobre a destinação o lodo de ETA, abrangendo múltiplas áreas de pesquisa e aplicabilidades. Mousavi e Nayeri (2022) dedicaram-se à recuperação e reutilização de coagulantes, enquanto He *et al.* (2024) focaram na reciclagem do lodo. Ahmad *et al.* (2016) abordaram a gestão sustentável desse resíduo, e Souza *et al.* (2024), juntamente com Bernegossi *et al.* (2022), analisaram os impactos ecotoxicológicos e as implicações ambientais de seu uso. Além disso, Ren *et al.* (2018) investigaram a ativação e modificação do lodo para a produção de adsorventes e remoção de poluentes. Estudos como Carvalho Gomes *et al.* (2019) e Sheng *et al.* (2021) investigaram o uso do lodo na fabricação de materiais de construção. A reutilização do lodo sob a perspectiva da economia circular foi abordada por Nguyen *et al.* (2022), enquanto Sharma e Ahammed (2023) examinaram sua aplicação no tratamento de águas e esgoto após modificações. Yuan e Zhu (2023) dedicaram-se à melhoria das propriedades do lodo, assim como sua capacidade na remoção de umidade.

Apesar do crescente número de pesquisas, ainda não há uma revisão cientométrica que sintetize o estado atual do conhecimento sobre o lodo de ETA. Essa lacuna destaca a importância de análises cientométricas para compreender a produção científica e orientar novos estudos. Compreender o panorama da produção científica possibilita que órgãos governamentais, indústrias e empresas de saneamento tomem decisões mais assertivas sobre o financiamento de pesquisas e

o planejamento estratégico. Essa metodologia fornece embasamento para a atualização de legislações ambientais, assegurando que sejam fundamentadas em evidências científicas.

Este artigo tem como objetivo responder questões fundamentais para a compreensão do panorama científico sobre as potencialidades do lodo de estações de tratamento de água potável, examinando quais países lideram a produção científica nesse campo, as redes de coautoria mais influentes e os periódicos de maior impacto na publicação de estudos sobre a temática. Por meio de uma análise detalhada, o estudo investiga padrões e tendências de publicação, identificando autores, revistas e países mais produtivos e influentes, além de avaliar o crescimento temporal no número de publicações. Com uma abordagem cienciométrica, este trabalho mapeia a evolução histórica e temporal do tema, destacando periódicos importantes, autores de destaque, instituições com maior produção científica e parcerias colaborativas, ao mesmo tempo em que revela como o conhecimento sobre o lodo de água potável foi construído ao longo dos anos. Assim, fornece um panorama das tendências atuais e dos principais direcionadores de pesquisa, com o intuito de apoiar estudos futuros na área e refletir os avanços contínuos e sustentados na pesquisa sobre lodo de estações de tratamento de água.

Com base em uma análise abrangente de 198 publicações científicas recentes, este artigo investiga as tendências e os impactos da pesquisa sobre a reutilização do lodo de ETA. Utilizando métricas de impacto, como o índice InOrdinatio (metodologia que possibilita a revisão sistemática), e ferramentas de visualização de dados, foram identificadas palavras-chave relacionadas ao lodo de tratamento de água potável em estações de tratamento de esgoto, características do lodo de ETA, uso do lodo e sua toxicidade, recuperação de coagulantes, propriedades adsorventes e degradação de hormônios.

2.2 Metodologia

Para atingir o objetivo desta pesquisa, foi realizada uma Revisão Cienciométrica da Literatura utilizando a metodologia *Methodi Ordinatio 2.0*, desenvolvida por Pagani *et al.* (2022). Esta metodologia é classificada como um método de decisão multicritério que emprega três variáveis e três fatores de

ponderação para ordenar um portfólio de artigos com base em sua relevância científica. As variáveis e suas ponderações foram:

- **Ano de Publicação (PubYear):** Representa o ano em que o artigo foi publicado, ponderado pelo fator λ , um parâmetro de 0 a 10 que avalia a importância do ano de publicação.
- **Número de Citações (Ci):** Indica o número de citações que o artigo recebeu, conforme disponibilizado na plataforma do Google Acadêmico. É ponderado pelo fator Ω , um parâmetro de 0 a 10 que avalia a importância das citações recebidas pelo artigo.
- **Fator de Impacto (IF):** Refere-se ao fator de impacto da revista em que o artigo foi publicado. Essa métrica permite avaliar o impacto de uma revista na comunidade científica, ponderado pelo fator Δ , que varia de 0 a 10.
- **ResearchYear:** Ano em que a pesquisa está sendo realizada.
- **CitedHalfLife:** Representa a mediana Cited Half-Life de periódicos com JCR 2020 (7,6).

Com base nesses parâmetros, a metodologia utiliza uma equação denominada *InOrdinatio 2.0*, conforme apresentado na Equação (1).

$$Inordinatio\ 2.0 = \left\{ [\Delta * (IF)] - \left[\frac{ResearchYear - PubYear}{CitedHalfLife} \right] + \Omega * \left[\frac{Ci}{(ResearchYear + 1) - PubYear} \right] \right\}$$

Para isso, foram conduzidas as nove etapas da metodologia conforme descrito a seguir: as etapas 1 e 2 visaram definir a intenção da pesquisa e realizar buscas exploratórias nas bases de dados, com o intuito de identificar combinações de palavras-chave que mais se encaixassem à temática abordada nesta pesquisa, bem como visualizar quais bases retornavam o maior número de artigos. Com base nos resultados das etapas anteriores, foi possível, nas etapas 3 e 4, definir as combinações de palavras-chave mais adequadas e as bases de dados, e, por fim, foram realizadas as pesquisas finais. A seleção das bases de dados baseou-se no número de artigos resultantes das buscas exploratórias, e as seguintes configurações foram definidas para buscar artigos nas bases:

- **Tipo de documento:** Apenas artigos e revisões;
- **Pesquisar por:** Título, resumo e palavras-chave;
- **Sem corte temporal.**

Assim, a busca final foi realizada, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Busca final nas bases de dados.

	Combinações de palavras-chave	Scopus	Web of Science	Science Direct
1	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND ("toxic*" OR "bioindicators")	36	40	11
2	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND ("estrogen" OR " estrone(E1)" OR "17 β -estradiol (E2)"OR "estriol (E3)"OR" 17 α -etinilestradiol (EE2)")	2	0	0
3	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND "coagulante"	69	57	25
4	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND "adsorption"	125	115	25
5	"aluminum based water treatment sludge"	9	4	4
6	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND ("estrogen" OR "endocrine disruptors")	2	1	2
7	("water treatment sludge" OR "drinking water treatment sludge") AND ("Daphnia magna " OR "Vibrio fischeri ")	2	1	0
8	("sewage treatment plant" OR "water treatment plant") AND "estrogen degradation"	6	5	2
9	"toxic*" AND ("sewage treatment plant" OR "water treatment plant") AND "estrogen degradation"	1	0	0
TOTAL		544		

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Etapa 5, foram aplicados os procedimentos de filtragem. Essa etapa tem como objetivo eliminar artigos duplicados utilizando o gerenciador de referências JabRef. Os artigos de conferência e aqueles fora da temática foram eliminados por meio da leitura dos títulos e resumos dos artigos. Efetivamente foram utilizados nessa pesquisa 198 artigos, sendo 346 excluídos conforme observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Procedimentos de filtragem.

Filtros	Artigos excluídos
Duplicatas	246
Tipo de documento	12
Fora da Temática	14
InOrdinatio > 0	74
Total de artigos excluídos	346
Total de artigo no portfólio	198

Fonte: Autoria própria (2024).

A Etapa 6 consistiu em coletar as variáveis para a ordenação dos artigos. A metodologia *Methodi Ordinatio* atualizada inclui uma planilha Excel denominada *RankIn 2.0*, que coleta automaticamente o ano de publicação, o fator de impacto de cada artigo e fornece um link para o Google Acadêmico, onde pode ser encontrado o número de citações do artigo. Para esta pesquisa, os valores para λ e Ω foram estabelecidos como 10, e para Δ como 3, visto que a presente pesquisa focou em buscar estudos mais recentes e mais citados sobre o assunto.

A ordenação do portfólio teve início na Etapa 7. Após o preenchimento da planilha *RankIn* 2.0 com as variáveis, a Equação *InOrdinatio* 2.0 (1) foi aplicada, resultando em um portfólio de artigos ordenado por relevância científica, conforme Tabela do Apêndice A. Após a ordenação, devido à grande quantidade de artigos, apenas os artigos com *InOrdinatio* maior ou igual a zero foram considerados para leitura, visto que esse valor representa o maior *InOrdinatio* obtido pelos artigos publicados em 2024, preservando a atualidade das publicações.

Nas últimas duas etapas, 8 e 9, os artigos do portfólio foram localizados, armazenados, e deu-se início às análises sistemáticas. Assim, a partir da construção do portfólio, deu-se início aos procedimentos de coleta e análise de dados.

2.3 Resultados e Discussão

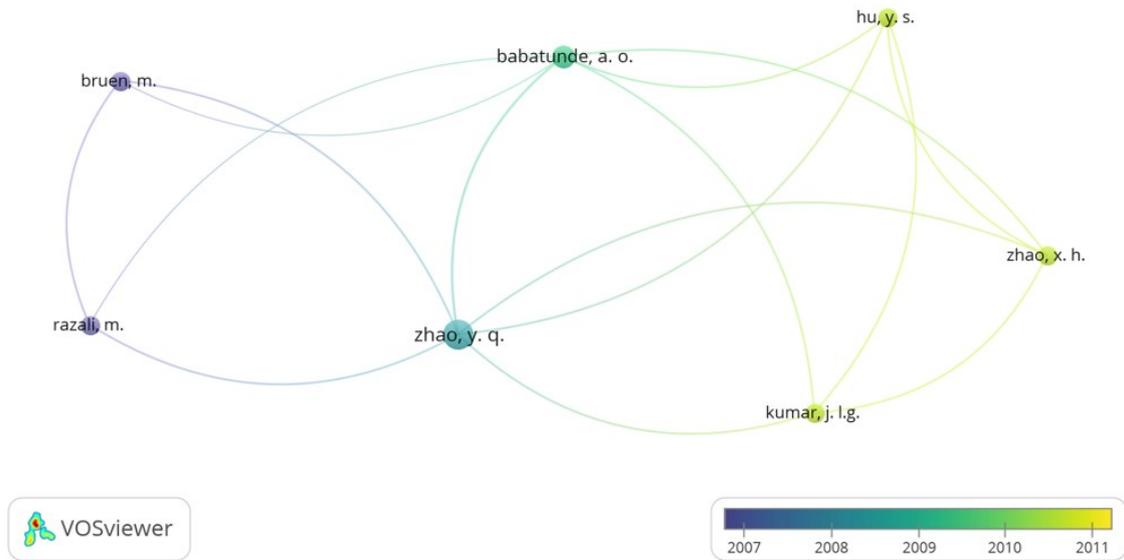
Foram realizadas análises cienciométricas para contextualizar o portfólio de artigos obtido. A primeira análise, utilizando a funcionalidade de densidade de autores do software *VOSviewer*, teve como objetivo identificar os principais pesquisadores atuantes no campo de estudo e as palavras-chave, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2.

Adicionalmente, as Figuras 3 a 6 foram elaboradas com o uso do software Microsoft Excel, oferecendo uma visão detalhada dos dados extraídos e auxiliando na interpretação das tendências identificadas.

2.3.1 Análises da Palavras Chaves e Autores

A partir dos dados disponibilizados no software, a análise de autores, ilustrada na Figura 1, revela que o portfólio de pesquisa sobre lodo de tratamento de água é constituído por uma rede de pesquisadores com diferentes níveis de contribuição e conectividade. O autor Yaqian Zhao destaca-se como o principal produtor, com 5 publicações, evidenciando uma contribuição consistente para o avanço da área. Em especial, o artigo “Eficácia de um lodo de tratamento de água potável na remoção de diferentes espécies de fósforo da solução aquosa”, publicado no ano de 2007, na revista *Separation and Purification Technology*, recebeu 265 citações, demonstrando uma influência significativa.

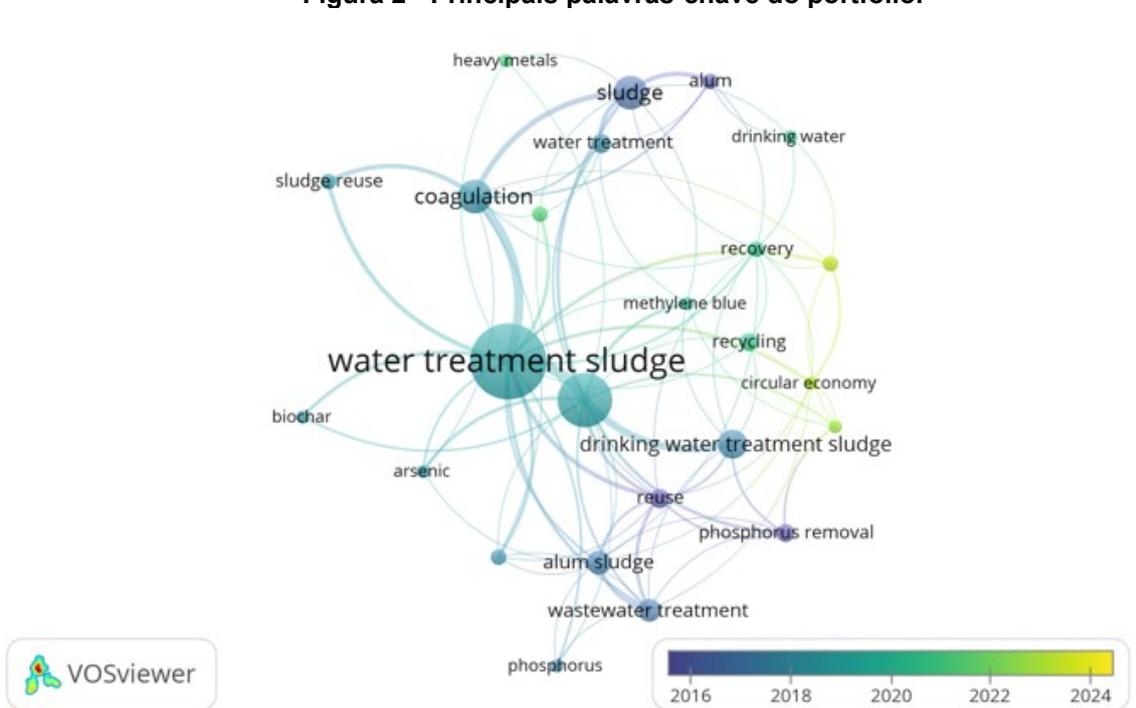
Figura 1 - Principais autores do portfólio.



Fonte: Autoria própria (2024).

Foi realizada também a análise das principais palavras-chave do portfólio de artigos, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Principais palavras-chave do portfólio.



Fonte: Autoria própria (2024).

O portfólio analisado contém 590 palavras-chave distintas, com o termo “*water treatment*” presente em 66 delas. A análise das palavras-chave (Figura 2) destaca a predominância de termos como “*water treatment*”, “*adsorption*”, “*coagulation*”,

“*sludge*”, “*sewage*”, “*drinking water*” “*water treatment sludge*”, “*reuse*” e “*recovery*”, e aponta para a crescente aplicação dos princípios da economia circular, promovendo a reutilização do lodo e a recuperação de componentes, como alumínio e fósforo, evidenciada pela relevância de termos como “*phosphorus removal*”. Esses termos refletem o foco em soluções de purificação, tratamento de resíduos e estratégias baseadas em adsorção. A frequência elevada dos termos “*adsorption*” e “*sludge*” destaca o crescente interesse pelas técnicas de adsorção no reaproveitamento de lodo de ETA, refletindo as atuais tendências de sustentabilidade e gestão eficiente de resíduos. A literatura reforça esse enfoque, apontando a adsorção como uma solução eficaz para a remoção de contaminantes e o aproveitamento máximo de resíduos (Hua; Haynes; Zhou, 2018). Esses resultados reforçam o papel estratégico do lodo de ETA na gestão sustentável de recursos hídricos e no avanço de práticas inovadoras para a valorização de resíduos.

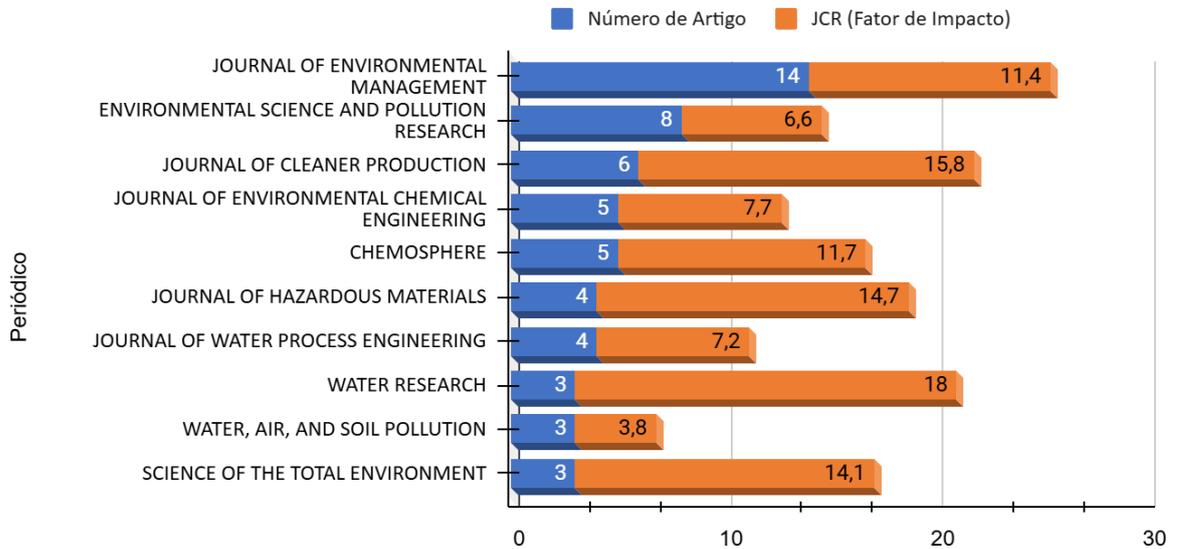
Na análise apresentada no gráfico gerado pelo *VOSviewer*, os *clusters* representam grupos de termos ou palavras-chave que frequentemente aparecem juntos em artigos científicos relacionados ao tema “*water treatment sludge*”. Esses clusters ajudam a identificar áreas temáticas ou subtemas dentro da pesquisa. Os clusters identificados refletem uma ampla gama de pesquisas relacionadas ao lodo de ETA, abrangendo desde aplicações práticas, como adsorção e remoção de fósforo, até estratégias sustentáveis de manejo e recuperação de recursos. Essa diversidade de temas evidencia o papel estratégico do lodo no contexto da economia circular e no desenvolvimento de tecnologias avançadas para tratamento de água e efluentes. A organização dos clusters também destaca uma evolução temporal no campo, sugerindo uma intensificação dos estudos mais recentes em áreas como reciclagem e impacto ambiental, conforme mostrado pelo gradiente de cores.

2.3.2 Países e Instituições Produtivas

A Figura 3 evidencia a distribuição geográfica das pesquisas, destacando a Ásia, Oceania e América do Sul como as regiões mais produtivas. A liderança da China e da Índia reflete os investimentos desses países em tecnologias de tratamento ambiental, impulsionados pelos desafios hídricos e ambientais decorrentes da urbanização e industrialização aceleradas.

Figura 4 - Principais Revistas que foram publicados os artigos.

Top 10 Periódicos com o Maior Número de Artigos Publicados



Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa forma, a avaliação da importância de uma revista deve considerar tanto o volume de publicações quanto o impacto refletido em indicadores como o JCR. Além disso, a presença de periódicos com perfis editoriais variados, incluindo abordagens focadas em sustentabilidade, controle da poluição, engenharia de processos e gestão de recursos, evidencia a complexidade e a natureza interdisciplinar do campo de pesquisa sobre lodo de tratamento de água.

2.3.2 Produção Científica ao Longo do Tempo

A Figura 5 possibilita a identificação de áreas mais e menos exploradas, facilitando a visualização de tendências e lacunas a serem abordadas em pesquisas futuras. Com base na análise, os tópicos "Adsorção" e "Recuperação de Coagulante" apresentaram os maiores percentuais de publicações, correspondendo a 27% e 25%, respectivamente, o que destaca sua relevância nas pesquisas científicas atuais.

Figura 5 - Divisão dos artigos por tema.

Fonte: Autoria própria (2024).

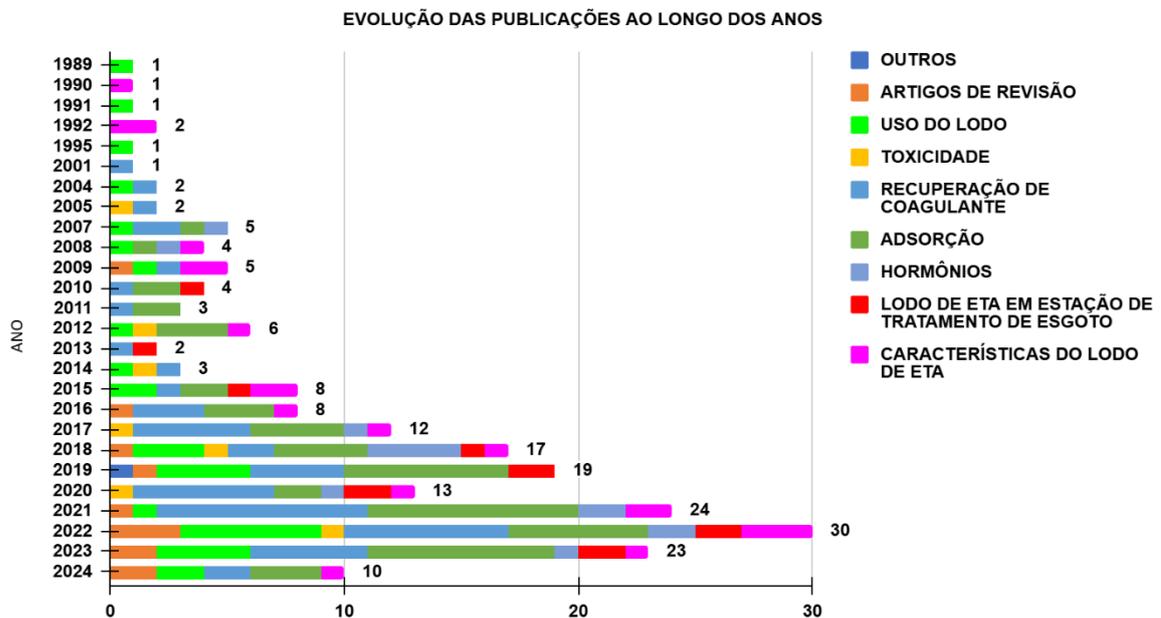
Adicionalmente, áreas como "Uso de Lodo" (15%) e "Características do Lodo de Tratamento de Água" (10%) demonstraram representatividade significativa, evidenciando um foco crescente na caracterização e aplicação prática do lodo em diferentes contextos. Em contraste, temas como "Toxicidade" (4%) e "Degradação de Hormônios" (7%) foram menos abordados, correspondendo a uma menor proporção de estudos publicados.

As áreas de menor representatividade evidenciam lacunas significativas na literatura científica, no que diz respeito à toxicidade do lodo e aos impactos de contaminantes emergentes, como hormônios. A análise dos resultados reportados nos poucos estudos disponíveis sobre toxicidade pode oferecer subsídios para avaliar sua relevância no contexto ambiental e suas implicações na mitigação de riscos. Esse cenário ressalta a necessidade de estudos integrados e multidisciplinares, capazes de aprofundar a compreensão dos efeitos adversos desses compostos e contribuir para o desenvolvimento de abordagens inovadoras e sustentáveis no gerenciamento do lodo.

A Figura 6 evidencia um aumento no volume de artigos sobre o objetivo do estudo a partir dos anos 2000, com um crescimento ainda mais acentuado após 2015.

Esse padrão coincide com o fortalecimento das políticas ambientais globais e a promoção das agendas de sustentabilidade, especialmente após o lançamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela ONU em 2015, destacando-se o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e o ODS 14 (Proteger a Vida Marinha). Os picos registrados em 2019, 2021 e 2022 sugerem um interesse renovado, possivelmente impulsionado por crises ambientais e pela busca de soluções para a gestão de resíduos.

Figura 6 - Número anual e tendências de publicações de 1989 ao ano 2024 (agosto).



Fonte: Autoria própria (2024).

Esse crescimento contínuo reflete o reconhecimento do lodo de ETA como um recurso subutilizado, mas com grande potencial, alinhando-se às tendências globais de reaproveitamento e economia circular, conforme Kada *et al.* (2024). Embora o tema do reaproveitamento de lodo de ETA tenha avançado significativamente, áreas críticas permanecem sub exploradas, como a toxicidade de materiais derivados do lodo em sistemas ambientais e de tratamento. Estudos de Souza *et al.* (2024) indicam que compostos remanescentes no lodo podem conter traços contaminantes, incluindo metais pesados, cuja liberação pode representar riscos à biota aquática e à saúde humana. O desenvolvimento de protocolos padronizados para avaliar a toxicidade é importante para garantir a segurança do reaproveitamento em aplicações industriais e agrícolas.

A manipulação de hormônios, como o 17 β -estradiol (hormônio sexual), presente em sistemas de esgoto, ainda é um desafio técnico relevante. Mousavi e Nayeri (2022) destacam que o lodo de ETA possui propriedades adsorventes que poderiam ser aproveitadas para a remoção desses compostos, mas faltam estudos que demonstrem a eficiência desse processo em larga escala. A ausência de investigações realizadas sobre o impacto desses contaminantes emergentes impede a implementação de tecnologias de reaproveitamento com maior segurança ambiental.

A Tabela 3 destaca os trabalhos mais relevantes sobre a gestão sustentável e reaproveitamento do lodo, classificados com base no número total de citações e na média de citações anuais. O estudo de maior destaque é o de Ahmad *et al.* (2016), com 427 citações e uma média anual de 53,37, evidenciando sua relevância. Esse trabalho aborda a gestão sustentável com base no conceito dos 3R (Reduzir, Reutilizar, Reciclar), um tema central para o avanço na sustentabilidade. O estudo discute os desafios ambientais, econômicos e operacionais associados à geração e disposição desse resíduo, propondo estratégias para minimizar sua produção na fonte, como melhorias nos processos de coagulação e floculação (Reduzir). Além disso, analisa o potencial de reutilização do lodo em aplicações diretas, como na remoção de poluentes ou em atividades agrícolas e industriais (Reutilizar), e explora formas de reciclá-lo, transformando-o em materiais úteis, como insumos para a fabricação de cimento, tijolos e outros produtos de construção (Reciclar).

Quadro 3 - Publicações com mais citações do portfólio.

Classificação	Título	Autores /Ano	Local de publicação	Total de citações	Média por ano
01	Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept	Ahmad; Ahmad; Alam, 2016	Journal of Cleaner Production	427	53,37
02	Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks	Chiang et al., 2009	Journal of Hazardous Materials	310	20,66
03	Sorption of Heavy Metals by Inorganic and Organic Components of Solid Wastes: Significance to Use of Wastes as Low-Cost Adsorbents and Immobilizing Agents	Zhou; Haynes, 2010	Critical Reviews in Environmental Science and Technology	291	20,78

04	17 β -estradiol-degrading bacteria isolated from activated sludge	Yu; Roh; Chu, 2007	Environmental Science and Technology	283	16,64
05	Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution	Razali; Zhao; Bruen, 2007	Separation and Purification Technology	263	15,47
06	Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review	Gomes et al., 2019	Resources Conservation and Recycling	221	44,2
07	Redox transformations of arsenic and iron in water treatment sludge during aging and TCLP extraction	Meng et al., 2001	Environmental Science and Technology	213	9,26
08	Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment	Zhao et al., 2011	Process Biochemistry	211	16,23
09	The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater	Nair; Ahammed, 2015	Journal of Cleaner Production	194	21,55
10	Content and fractionation of heavy metals in water treatment sludges	Elliott; Dempsey; Maille, 1990	Journal of Environmental Quality	192	5,64

Fonte: Autoria própria (2024).

Outros estudos destacados, como os de Chiang *et al.* (2009), Zhou e Haynes (2010) e Yu *et al.* (2007), exploram diferentes aplicações, a exemplo do uso do lodo na fabricação de tijolos, ou como adsorvente de metais pesados e na remoção de fósforo. Esses trabalhos investigam maneiras de reduzir o impacto ambiental do lodo e agregam valor a esse resíduo por meio de aplicações práticas e inovadoras, visando à sustentabilidade e ao reaproveitamento do lodo, destacando sua versatilidade. Os estudos analisam sua aplicação em materiais de construção, tratamento de águas residuais ou remediação ambiental, demonstrando sua utilidade em processos de economia circular. Além disso, destaca-se a integração do lodo com outros materiais residuais, o uso de bactérias isoladas do lodo para degradação de compostos hormonais e a criação de sistemas integrados para aprimorar o tratamento de efluentes.

Esses estudos apresentam significativa relevância científica e prática, fornecendo subsídios essenciais para o desenvolvimento de políticas públicas,

regulamentações ambientais e inovações tecnológicas aplicadas ao setor de saneamento. Ao integrar conhecimento teórico e prático, essas pesquisas promovem avanços nas estratégias de gestão sustentável, contribuindo para soluções eficientes e alinhadas aos desafios contemporâneos. A aplicação desses resultados impacta diretamente a formulação de práticas mais eficazes, favorecendo o uso responsável dos recursos e fortalecendo a capacidade de resposta do setor frente às demandas ambientais e sociais.

A revisão desta pesquisa adotou como escopo apenas publicações disponíveis em bases de dados indexadas, o que pode ter resultado na exclusão de estudos relevantes não acessíveis nessas plataformas. Essa limitação pode influenciar a abrangência dos resultados apresentados. Além disso, a análise realizada não avaliou a qualidade metodológica individual de cada estudo incluído, o que pode limitar a interpretação detalhada dos achados. Sugere-se que futuras revisões podem considerar abordagens mais amplas e integrativas sobre esse assunto.

2.4 Considerações Finais

Os resultados obtidos apontaram para um aumento consistente no número de publicações ao longo do tempo (1989 a 2024), evidenciando o interesse contínuo na busca por soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão desse resíduo. A análise revelou um crescimento nas pesquisas relacionadas ao tema, com destaque para contribuições oriundas principalmente da Ásia, Oceania e América do Sul. As redes de coautoria identificaram Yaqian Zhao como pesquisador central. Os periódicos *Journal of Environmental Management* e *Water Research* destacaram-se como as publicações mais influentes na área. A produção científica apresentou um aumento acentuado a partir de 2015, refletindo uma crescente atenção ao reaproveitamento de resíduos na área acadêmica.

Identificou que os principais assuntos abordados estão correlacionados a: adsorção, recuperação de coagulante e usos do lodo, porém, nesse estudo identificou lacunas importantes que sugerem a necessidade de ampliar as investigações sobre o potencial de toxicidade do lodo de ETA quando utilizado como coagulante, e se ele tem capacidade de remover hormônios em sistemas de tratamento de esgoto, considerando suas propriedades específicas.

CAPÍTULO 3 - DESTINAÇÃO DE LODO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO COM AVALIAÇÃO DE TOXICIDADE

3.1 Introdução

O tratamento de água tem uma função importante no processo de abastecimento humano, assegurando que a água atenda a padrões físico-químicos adequados (OMS, 2017). Durante os tratamentos convencionais, processos como coagulação, floculação, sedimentação e filtração resultam na geração de grandes volumes de resíduos, entre os quais se destaca o lodo proveniente da etapa de sedimentação (também chamado de lodo de ETA). Esse resíduo é composto predominantemente de hidróxidos de alumínio e ferro, matéria orgânica e partículas suspensas (Abdelrahman *et al.*, 2023).

O crescimento populacional e conseqüentemente o aumento do volume de resíduos decorrentes de atividades antrópicas exige a adoção práticas de redução, reutilização e reciclagem de materiais (Kang *et al.*, 2022). Inevitavelmente, o aumento da população aumenta a demanda por água tratada, gerando mais resíduos, como o lodo de ETA. Nos países desenvolvidos que integram a União Europeia (UE), a gestão de resíduos é regida pela Diretiva (UE) 2018/850, que estabelece regras rigorosas para a disposição de resíduos em aterros. Essa normativa incentiva a valorização de resíduos e a transição para uma economia circular, promovendo a reutilização e reciclagem por meio de metas específicas até 2030 e medidas restritivas para o descarte de resíduos recicláveis.

Enquanto países desenvolvidos, como os membros da União Europeia, implementaram diretrizes rigorosas, no Brasil a realidade é distinta. Onde a gestão do lodo de ETA não é eficiente, e há preocupação de que práticas de descarte possam levar à contaminação do solo e da água e à saturação dos aterros (Likus *et al.*, 2021). Pesquisa do IBGE (2017) revela que 69% dos resíduos de ETA no Brasil têm descarte irregular. Essa prática afeta diretamente mananciais utilizados para abastecimento e contribui para a saturação de aterros sanitários, custos elevados para o tratamento e riscos ambientais (Zakaria *et al.*, 2024).

Por sua vez, a recuperação de coagulantes do lodo de ETA, como o alumínio e o ferro, é uma alternativa promissora para mitigar esses impactos. Esses coagulantes recuperados podem ser reutilizados em tratamentos de águas residuais,

promovendo a eficiência no uso de recursos e reduzindo os danos ambientais (Ramadan; Sayed; Aziz, 2020). Além disso, o lodo de ETA possui propriedades físico-químicas que favorecem seu reaproveitamento, como alta capacidade de adsorção e porosidade (Fantasia; Lakhal; Idlimam, 2022). Essas características dependem de fatores como o tipo de coagulante e as condições operacionais da ETA (Chen *et al.*, 2015).

O reaproveitamento do lodo da ETA em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) apresenta potencial para aplicações como coagulantes na remoção de fósforo e matéria orgânica (Mora-León *et al.*, 2022). No entanto, embora promissor, o uso do lodo em processos de tratamento de esgoto ainda demanda estudos detalhados, incluindo avaliações de toxicidade em organismos aquáticos e análise de impactos em escala real (Li *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2022).

Ensaio ecotoxicológicos realizados com bioindicadores, como *Daphnia magna*, *Daphnia similis*, *Heterocypris incongruens* e macroinvertebrados bentônicos, têm demonstrado os riscos potenciais do descarte inadequado do lodo de ETA in natura para ecossistemas terrestres e aquáticos (Sotero-Santos *et al.*, 2005; Costa *et al.*, 2017; Ranjbar *et al.*, 2017; Szara *et al.*, 2020). A *Daphnia magna* é amplamente utilizada para avaliar os efeitos letais e subletais em aquários de água doce (Ranjbar *et al.*, 2017), enquanto o *Vibrio fischeri* é empregado para medir impactos rápidos em sistemas biológicos, com base no ensaio de inibição de emissão de luz por bactérias luminescentes. A combinação desses bioindicadores é essencial para identificar toxinas que poderiam ser negligenciadas em testes isolados, proporcionando uma análise mais abrangente (Ramteke *et al.*, 2019). Esses estudos reforçam a necessidade de práticas sustentáveis no manejo do lodo, principalmente no contexto das ETEs, onde é necessário garantir segurança e eficiência operacional (Bernegossi *et al.*, 2022).

Essa lacuna torna-se especialmente importante no contexto das ETEs, dada a necessidade de práticas sustentáveis e seguras no manejo de resíduos. Dentro do exposto, este estudo teve como objetivo principal analisar a toxicidade do lodo de ETA e sua influência em parâmetros operacionais, como dosagem e sedimentação, quando aplicado no tratamento primário de esgoto em ETEs. A avaliação incluiu ensaios ecotoxicológicos com bioindicadores, como *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*, e a análise de parâmetros físico-químicos, como turbidez, fósforo, alumínio, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos

Dissolvidos Totais (SDT) e Sólidos Totais (ST), antes e após a aplicação do lodo de ETA. Ao integrar esses resultados, o trabalho buscou validar a aplicação desse resíduo, contribuindo para o desenvolvimento de procedimentos operacionais que promovam sua utilização de forma eficaz e sustentável nas estações de tratamento de esgoto.

3.2 Metodologia

3.2.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi conduzida com uma Estação de Tratamento de Água (ETA) e uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), localizadas na região extremo oeste do estado de Santa Catarina, Brasil. As características principais dessas unidades estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características da ETA e da ETE.

Parâmetro	ETA	ETE
Tipo de Coagulante Utilizado	Policloreto de Alumínio (PAC)	Não aplicável
Processos Operacionais	Coagulação, Flocculação, Sedimentação, Filtração e desinfecção	Tratamento Primário, Tratamento secundário (Reator UASB e Lodo Ativado Batelada) e Deságue de lodo
Resíduos Produzidos	Lodo composto por alumínio, matéria orgânica	Lodo biológico

Fonte: Autoria própria (2024).

O lodo da ETA foi obtido na saída do decantador e do flocculador; já o esgoto bruto foi coletado na ETE, no canal de entrada da calha Parshall.

3.2.2 Coleta de amostras

Além disso, as amostras do Teste do Jarro foram compostas pela mistura do lodo da ETA com o esgoto bruto, em diferentes concentrações de lodo, permitindo a realização dos testes conforme as condições propostas. Esses pontos foram escolhidos devido à representatividade das amostras no processo operacional.

3.2.3 Caracterização Físico- Química

As análises físicas e químicas foram realizadas nos Laboratórios de Efluentes da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), em Chapecó, Santa

Catarina, e na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), em Francisco Beltrão, Paraná, seguindo os métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Ensaios ecotoxicológicos foram realizados no Laboratório da empresa UMWELT Biotecnologia Ambiental, em Blumenau, Santa Catarina, de acordo com as normas ABNT NBR 12713:2022 e ABNT NBR 15411-3:2021.

Todas as amostras analisadas, tanto do lodo de ETA, esgoto bruto da ETE e amostras dos tratamentos foram acondicionadas em frascos (com e sem preservante, conforme cada parâmetro analisado), armazenadas em caixas térmicas resfriadas com gelo e transportadas para o laboratório, sendo mantidas sob refrigeração (4 °C) até a chegada ao laboratório e a realização das respectivas análises.

Os parâmetros avaliados foram selecionados por sua relevância no tratamento de esgoto e no atendimento à legislação brasileira. A Tabela 2 apresenta os parâmetros analisados para caracterização do lodo de ETA e do esgoto bruto coletado na ETE.

Tabela 2 - Parâmetros analisados para caracterização do lodo de ETA e do esgoto bruto.

Parâmetros	Lodo ETA	Esgoto Bruto	Metodologia
DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio		x	SMEWW 5210 D
DQO: Demanda Química de Oxigênio	x	x	SMEWW 5220 DA
Alumínio Residual	x	x	SMEWW 3500 AL B
SDT - Sólidos Dissolvidos Totais	x	x	SMEWW 2540 C (ADAPTADO)
SSV - Sólidos Suspensos Voláteis	x	x	SMEWW 2540 E (ADAPTADO)
SSF - Sólidos Suspensos Fixos	x	x	SMEWW 2540 E(ADAPTADO)
SST - Sólidos Suspensos Totais	x	x	SMEWW 2540 D
SS - Sólidos Sedimentáveis	x	x	SMEWW 2540 F
Turbidez		x	SMEWW 2130 B
OG: Óleos e Graxas		x	SMEWW 5520 D
FT: Fósforo Total		x	SMEWW 4500 P E

Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.4 Experimentos com lodo de ETA (Jar Test)

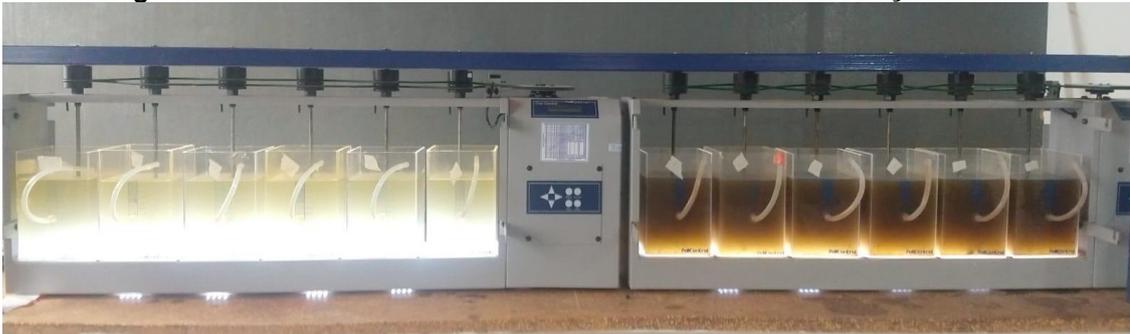
Os ensaios de mistura foram conduzidos em escala laboratorial, utilizando o equipamento jar test, marca (Policontrol, FlocControl), com seis jarros de 2 L cada. Os testes ocorreram em temperatura ambiente (25 ± 2 °C), com monitoramento dos valores de pH inicial e final, sendo constatada a ausência de alterações significativas.

A metodologia seguiu uma adaptação das propostas de Guan *et al.* (2003), Demirkol *et al.* (2020), Kang *et al.* (2022) e Abdelrahman *et al.* (2023), contemplando

três etapas: a mistura rápida, realizada com agitação a 120 rpm por 1 minuto; a mistura lenta, realizada com agitação a 30 rpm por 14 minutos; e a sedimentação, aplicada em diferentes tempos, para simular condições reais de tratamento primário.

Foram realizados três experimentos com dosagens diferentes, com 3, 8 e 13% de uso lodo de ETA. As dosagens de lodo de ETA no esgoto bruto e os tempos de sedimentação estão detalhados na Tabela 03. As concentrações de lodo foram adaptadas de Guan *et al.* (2003), Demirkol *et al.* (2020), Kang *et al.* (2022) e Abdelrahman *et al.* (2023). E a geração de resíduos nos decantadores e filtros pode variar entre 0,1% e 3% do volume total de água tratada (Scalize; Albuquerque; Di Bernardo, 2021; Turner *et al.*, 2019). Esse volume reforça a necessidade de estratégias adequadas para sua destinação, uma vez que o descarte direto em ETEs não possui regulamentação específica. A Fotografia 1 apresenta a realização de um jar test, no qual diferentes concentrações de lodo de ETA foram misturadas ao esgoto bruto.

Fotografia 1 - Jar teste sendo realizado em diferentes concentrações de lodo.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 3 apresenta as concentrações de lodo provenientes do tratamento primário da ETA misturadas ao esgoto bruto, bem como os respectivos tempos de sedimentação utilizados nos testes experimentais. As dosagens de lodo variaram entre 3% e 13%, enquanto os tempos de sedimentação foram ajustados para 15, 37,5 e 60 minutos.

Tabela 3 - Concentrações de lodo e tempos de sedimentação utilizados nos ensaios.

Teste	Dosagem De Lodo %	Tempo De Sedimentação
1	13	60
2	13	15
3	3	60
4	3	15
5	8	37,5
6	8	37,5
7	8	37,5

Fonte: Autoria própria (2024).

Após a conclusão de cada teste, o sobrenadante foi coletado e encaminhado aos laboratórios para a realização das análises necessárias. A Fotografia 2 ilustra os frascos contendo as amostras coletadas, destacando a organização do processo experimental.

Fotografia 2 - Frascos contendo as amostras de sobrenadante coletadas após os testes, prontas para envio aos laboratórios para análise.



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.5 Ensaio Ecotoxicológicos

Na área de estudo, a legislação que estabelece critérios de avaliação ecotoxicológica em efluentes líquidos lançados em corpos hídricos é a Portaria nº 017/02 – Ecotoxicidade, emitida pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA) de Santa Catarina. Os organismos bioindicadores utilizados são *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*, empregados para avaliar a toxicidade aguda de efluentes tratados.

Os ensaios foram conduzidos seguindo as normas técnicas da ABNT NBR 12713:2022 e ABNT NBR 15411-3:2021, utilizando diluições de 50% para *Daphnia magna* e 20% e 50% para *Vibrio fischeri* de efluente misturado, para simular gradientes ambientalmente relevantes, garantindo a confiabilidade dos resultados e

sua aplicação em cenários reais. As diluições escolhidas refletem concentrações utilizadas pela legislação.

3.2.6 Análises Estatísticas

Para avaliar os efeitos da dosagem de lodo e do tempo de sedimentação nos parâmetros físico-químicos do esgoto, foi aplicado um delineamento fatorial com ponto central. Essa abordagem estatística permite identificar as interações entre as variáveis estudadas.

A dosagem de lodo e o tempo de sedimentação foram testados em três níveis, conforme apresentado na Tabela 04. Essa tabela ilustra as variáveis estatísticas utilizadas nos testes, incluindo as variáveis codificadas e reais para dosagem de lodo (em %/L) e tempo de sedimentação (em minutos). Os valores variaram entre níveis alto (+1), médio (0) e baixo (-1), permitindo avaliar os efeitos dessas condições no processo.

Tabela 4 - Variáveis da estatística.

Teste	Variáveis codificadas		Variáveis reais	
	Dosagem de lodo	Tempo de sedimentação	Dosagem de lodo	Tempo de sedimentação
1	1	1	13	60
2	1	-1	13	15
3	-1	1	3	60
4	-1	-1	3	15
5	0	0	8	37,5
6	0	0	8	37,5
7	0	0	8	37,5

Fonte: Aatoria própria (2024).

Verificou-se se os dados provinham de uma distribuição normal através do teste *Shapiro-Wilk*. Em seguida utilizou-se o teste de análise de variância ANOVA para analisar se o tempo e a dosagem tinham valor de significância individualmente em cada resultado. Também foi realizada análise multivariada dos dados através da metodologia dos componentes principais para analisar o comportamento da interação de todas as variáveis resposta no processo. Todas análises estatísticas dos dados foram realizadas através do software R - versão 4.4.2.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Caracterização Físico- Química

A caracterização inicial do lodo de ETA e do esgoto bruto é essencial para compreender os impactos e os resultados dos ensaios de mistura (Mora-León et al., 2022). Os parâmetros analisados estão apresentados na Tabela 5, permitindo a avaliação detalhada das propriedades físico-químicas.

Tabela 5 - Caracterização do Lodo de ETA e do Esgoto Bruto.

Parâmetros	Lodo de ETA	Esgoto Bruto
DQO (mg/l)	4.050	797
DBO (mg/l)	-	502
Turbidez (NTU)	-	189
Alumínio (mg/l)	24	0,07
Fósforo Total (mg/l)	-	8,95
SDT (mg/l)	286	577
SSV (mg/l)	3.636	292
SST (mg/l)	13.476	415
ST (mg/l)	13.762	994

Fonte: Autoria própria (2024).

O lodo de ETA apresentou uma concentração elevada de matéria orgânica e inorgânica, conforme indicado pelos altos valores de DQO, enquanto o esgoto bruto exibiu níveis menores. Esses resultados indicam que o lodo da ETA contém quantidades importantes de uma alta concentração de matéria orgânica e inorgânica. Esse dado é fundamental porque a aplicação do lodo de ETA no tratamento do esgoto, em doses elevadas, pode interferir negativamente na capacidade de tratamento do sistema, dependendo da sua proporção. A DQO do lodo de ETA do presente estudo está de acordo com valores observados em outros estudos envolvendo lodos de ETAs convencionais, como os de Wu *et al.* (2020), que obtiveram valores de DQO entre 3.800 e 4.500 mg/L.

O valor da DBO encontrado no esgoto bruto é considerado elevado em relação aos valores normalmente reportados para esgotos domésticos, que variam entre 450 e 600 mg/L e são classificados como esgoto forte (Matos *et al.*, 2017).

Quanto à turbidez, do esgoto bruto apresentou turbidez de 189 NTU, indicando a presença de partículas em suspensão e a necessidade de coagulação e

sedimentação para remoção. A turbidez do esgoto bruto evidencia o potencial da aplicação do lodo como um coagulante, especialmente na remoção de fósforo e sólidos em suspensão. Estudos como Nair e Ahammed (2015) e Kang *et al.* (2022) reforçam a associação entre o alumínio e a formação de flocos estáveis, promovendo maior eficiência no tratamento.

O teor de alumínio no lodo da ETA foi superior ao do esgoto bruto. Esses resultados já eram esperados, uma vez que no tratamento de água são utilizados compostos de alumínio, além disso destaca o potencial do lodo de ETA como coagulante. Esse comportamento é consistente com estudos que associam o alumínio à formação de flocos estáveis, promovendo a clarificação do efluente (Nair; Ahammed, 2015; Kang *et al.*, 2022).

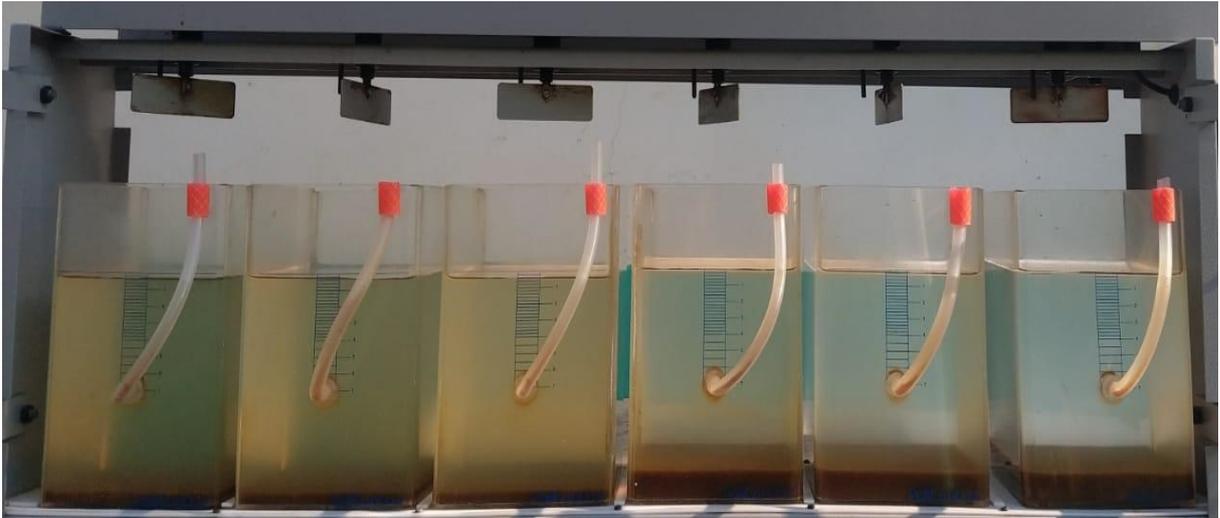
O fósforo total elevado no esgoto bruto ressalta a necessidade de estratégias eficazes de remoção para evitar a eutrofização de corpos hídricos receptores. Estudos de Kuldeyev *et al.* (2023) demonstram que o lodo de ETA pode ser eficiente nesse processo, especialmente em sistemas similares.

Por fim, os elevados de SST 13.476 mg/L e SSV 3.636 mg/L no lodo de ETA, em comparação ao esgoto bruto SST: 415 mg/L; SSV: 292 mg/L indicam alta carga de sólidos. Essa característica pode ser explorada para potencializar a remoção de partículas durante o tratamento do esgoto, como evidenciado por Verrelli *et al.* (2009).

3.3.2 Eficiência dos Ensaio de Mistura

Os ensaios de mistura avaliaram a eficiência da combinação de lodo de ETA com esgoto bruto sob diferentes condições de dosagem de lodo e tempos de sedimentação. A Fotografia 3 ilustra o processo de execução do teste de jarro, destacando a etapa de sedimentação.

Fotografia 3 - Jar teste sendo realizado em diferentes concentrações de lodo na etapa da sedimentação.



Fonte: A autoria própria (2024).

Na Tabela 6, são apresentados os resultados das análises realizadas para os diferentes experimentos.

Tabela 6 - Resultados dos Ensaios de Mistura.

Teste	Dosagem de Lodo (%)	Tempo de Sedimentação (min)	Turbidez (NTU)	Alumínio (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	SDT (mg/L)	ST (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
1	13	60	20	0,22	0,549	162	170	30	139
2	13	15	55	0,6	0,573	230	276	48	150
3	3	60	42	0,15	0,807	162	188	23,1	69
4	3	15	55	0,4	0,842	188	226	35	128
5	8	37,5	55	0,2	1,557	294	328	75	210
6	8	37,5	55	0,4	1,710	282	336	75	216
7	8	37,5	45	0,3	1,331	210	306	54	150

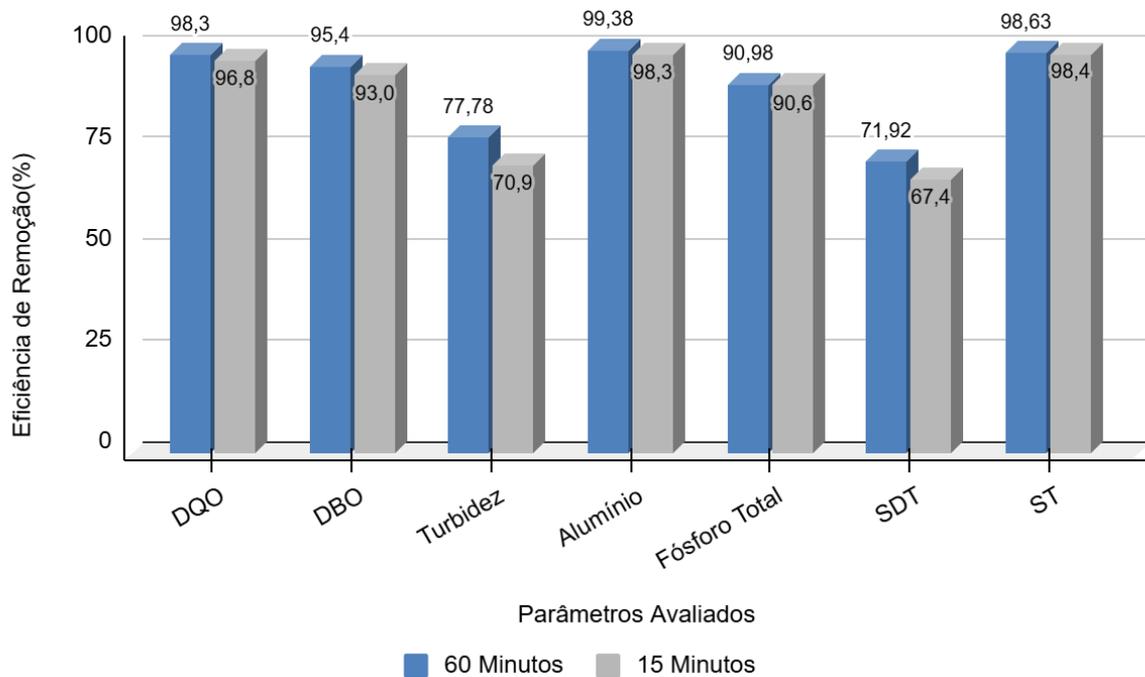
Fonte: A autoria própria (2024).

3.3.3 Análise de Resultados

Os resultados apresentados no Gráfico 1 demonstram a eficiência de remoção de diversos parâmetros após a dosagem de lodo de ETA a 3%, avaliando tempos de sedimentação de 15 e 60 minutos. Observa-se que a eficiência de remoção aumenta com o tempo de sedimentação, especialmente para alumínio (99,4%), fósforo total (91%) e DQO (98,3%). A DBO também apresenta remoção significativa (95,4%), reforçando a capacidade do lodo de ETA na redução de carga orgânica. Por outro lado, os sólidos dissolvidos totais (SDT) e a turbidez registram menores eficiências, variando de 67,42% a 71,9% e 70,9% a 77,8%, respectivamente, indicando desafios adicionais na remoção de partículas finas e matéria orgânica dissolvida. De maneira semelhante, Zhou *et al.* (2012) e Haiping e Zhu (2023) observaram variações na

remoção desses parâmetros em estudos relacionados, destacando que fatores como tempo de sedimentação e características do lodo influenciam diretamente na eficiência do processo.

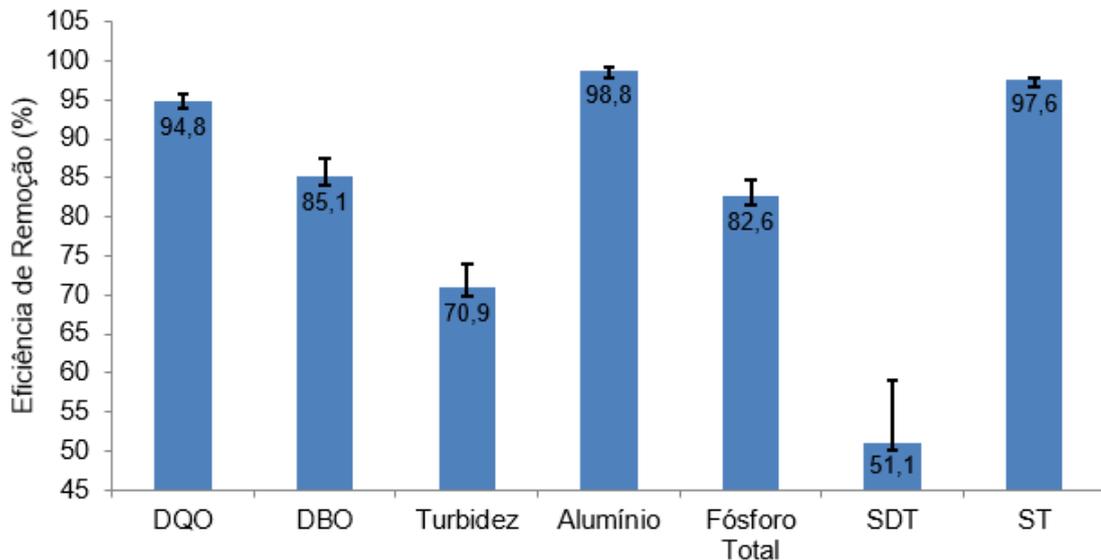
Gráfico 1 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio, e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo ETA 3%.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados apresentados no Gráfico 2 apresentam a eficiência de remoção de parâmetros operacionais utilizando uma dosagem de lodo de ETA a 8% e tempo de retenção de 37,5 minutos. O Alumínio apresentou a maior eficiência de remoção (98,8%), seguido pelos Sólidos Totais (97,6%) e a DQO (94,8%), demonstrando elevada capacidade de remoção desses compostos. A DBO e o Fósforo Total também apresentaram boas eficiências, com valores de 85,1% e 82,6%, respectivamente. A Turbidez registrou uma remoção de 70,9%, enquanto os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) tiveram a menor eficiência, com 51,1%, sugerindo a necessidade de tratamentos complementares para otimização da remoção desses compostos antes do lançamento no corpo receptor.

Gráfico 2 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo de ETA 8%.

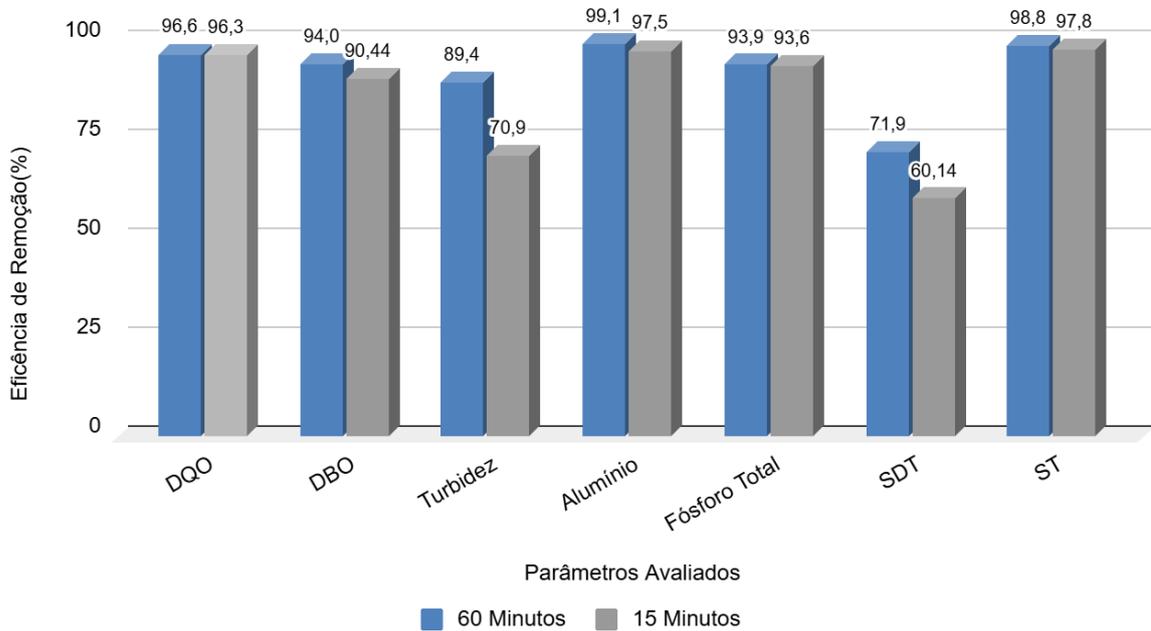


Fonte: Autoria própria (2024).

O gráfico 3 apresenta a eficiência de remoção de parâmetros operacionais com uma dosagem de lodo de ETA a 13% em tempos de retenção de 15 e 60 minutos.

Observa-se que a eficiência de remoção aumenta com o tempo de sedimentação, sendo que para turbidez (70,9% para 89,4%) e sólidos dissolvidos totais (SDT), que passaram de 60,14% para 71,9%. O desempenho para alumínio (99,1%), fósforo total (93,9%) e ST (98,8%) foi elevado após 60 minutos, confirmando a eficiência do lodo na clarificação e remoção de contaminantes. A DQO (96,6%) e a DBO (94,0%) também apresentaram altas remoções, reforçando o potencial do lodo para reduzir a carga orgânica. No entanto, a remoção de SDT permaneceu inferior a 75%, sugerindo a necessidade de otimizações para melhorar sua eficiência antes do descarte no corpo receptor.

Gráfico 3 - Eficiência de Remoção dos Parâmetros (Turbidez, Alumínio e Fósforo Total, Sólidos dissolvidos Totais, Sólidos Totais, Demanda Química de Oxigênio e Demanda Bioquímica de Oxigênio) em Função do Tempo de Sedimentação e da Dosagem de Lodo de ETA 13%.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados apresentados nos gráficos, baseados em três concentrações avaliadas, confirmam que o lodo de ETA é uma alternativa eficiente para o tratamento de águas residuais, especialmente na remoção de alumínio, fósforo total e sólidos totais, que atingiram eficiências superiores a 95% com dosagens mais elevadas e tempos de sedimentação prolongados. Esses achados corroboram os estudos de Kang *et al.* (2022) e Mora-León *et al.* (2022), que indicam que maiores concentrações favorecem a coagulação e a adsorção de poluentes. No entanto, é essencial considerar que dosagens elevadas podem aumentar a geração de resíduos, impactando os custos operacionais do processo.

O aumento do tempo de retenção também se mostrou determinante para a eficiência do tratamento, como evidenciado por Li *et al.* (2020) e Verrelli *et al.* (2009). Os gráficos indicam que parâmetros como turbidez e SDT apresentaram ganhos expressivos com tempos mais longos, destacando a importância da sedimentação prolongada para melhorar a qualidade do efluente. Contudo, mesmo com tempos estendidos, os parâmetros relacionados à matéria orgânica, como DQO e DBO, apresentaram eficiência entre 85% e 96%, sugerindo a necessidade de estratégias complementares, como processos biológicos ou tecnologias avançadas de oxidação, conforme discutido por Ahmad *et al.* (2017) e Yu *et al.* (2007).

Ao comparar as diferentes concentrações de lodo, a dosagem de 13% demonstrou a melhor eficiência geral, reforçando a tendência apontada em estudos anteriores, que indicam que concentrações mais altas aprimoram a remoção de poluentes via coagulação e adsorção (Fantasia *et al.*, 2022; Marguti *et al.*, 2018). Além dos benefícios operacionais, o uso do lodo de ETA no tratamento de águas residuais se alinha com os princípios da economia circular, ao promover o reaproveitamento de resíduos e reduzir impactos ambientais. Essa tendência está alinhada por Ahmad *et al.* (2016), Nguyen *et al.* (2022) e He *et al.* (2024), reforçando a relevância do reaproveitamento do lodo na gestão sustentável dos recursos hídricos.

3.3.4 Avaliação da Ecotoxicidade

A avaliação da toxicidade dos efluentes tratados é necessária para a compreensão dos impactos ambientais associados ao seu descarte. A necessidade de diluição das amostras, expressa pelo Fator de Toxicidade (FT), permite medir a intensidade dos efeitos adversos, enquanto parâmetros como a Concentração Efetiva Mediana (CE50) possibilita a quantificação da resposta dos organismos-teste, como *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* (ABNT NBR 12713:2022; ABNT NBR 15411-3:2021; Ranjbar *et al.*, 2017).

Estudos indicam que amostras com Fator de Diluição (FD) elevadas podem conter compostos que impactam negativamente a biota aquática, exigindo uma avaliação ecotoxicológica criteriosa para prevenir efeitos ambientais adversos (Pei *et al.*, 2018). Por outro lado, quando uma amostra apresenta FT1 e valores elevados de CE50, infere-se uma toxicidade reduzida, o que sugere que o efluente tratado possui menor potencial de impacto ambiental (Bernegossi *et al.*, 2022). Além disso, a Concentração Efetiva 20 (CE20) permite detectar efeitos subletais não identificáveis por meio da CE50, tornando-se um parâmetro primordial para a avaliação de impactos ambientais em concentrações reduzidas (ABNT NBR 15411-3:2021; Ranjbar *et al.*, 2017).

A integração dos parâmetros FT, CE50 e CE20 permite uma avaliação abrangente da toxicidade dos efluentes tratados. Amostras com FT elevado indicam a presença de substâncias que podem demandar um controle mais rigoroso antes do descarte. Em contrapartida, um FT reduzido, aliado a baixos índices de toxicidade, sugere que a adição do lodo da ETA na ETE não compromete a qualidade do efluente

final. Assim, a correlação entre esses indicadores contribui para uma compreensão mais precisa dos impactos ecotoxicológicos e fornece subsídios para a formulação de estratégias eficazes de gestão dos efluentes (Bernegossi *et al.*, 2022). Os resultados das análises de toxicidade com os bioindicadores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de Toxicidade Aguda de *Daphnia Magna* e *Vibrio Fischeri*.

Teste	Dosagem de Lodo (%)	Tempo de Sedimentação (min)	<i>Daphnia Magna</i>	<i>Vibrio Fischeri</i>		Fator de toxicidade
			CE50	CE20	CE50	FT
1	13	60	100%	52,80%	75,90%	2
2	13	15	89,09%	71%	>80%	2
3	3	60	100%	43,80%	68,50%	4
4	3	15	100%	64,98%	76,50%	2
5	8	37.5	93,89%	>80,00%	>80%	1
6	8	37.5	100%	61,20%	>80%	2
7	8	37.5	100%	66,10%	>80%	2

Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados indicam que a destinação do lodo de ETA em diferentes condições operacionais apresenta impacto variado na toxicidade dos efluentes tratados. Para *Daphnia magna*, observou-se que o CE50 foi maior no teste 2. Neste teste a CE50 foi atingida com a diluição 89% da amostra. Já para *Vibrio fischeri*, o CE50 variou entre 68,50% e >80%, sendo mais sensível às concentrações de lodo utilizadas. Esses dados confirmam os achados de Sotero-Santos et al. (2005), que destacaram o uso de bioindicadores como *Daphnia magna* para avaliar a toxicidade de resíduos de tratamento de água, evidenciando sua alta sensibilidade em condições subótimas de operação.

A toxicidade foi influenciada principalmente pela dosagem de lodo e pelo tempo de sedimentação. Testes com maior dosagem (13%) e menor tempo de sedimentação (15 min) apresentaram maior impacto, conforme observado no Teste 2 (CE 20:71%). A maior toxicidade observada em dosagens mais altas (13%) e tempos curtos de sedimentação pode estar associada à insuficiente remoção de compostos orgânicos coloidais e metais residuais principalmente o alumínio, indicando menor remoção de compostos tóxicos, devido ao tempo insuficiente para sedimentação dos mesmos. Estudos como os de Szara *et al.* (2020) relataram resultados semelhantes ao analisar sedimentos ricos em compostos residuais, destacando que menores tempos de tratamento podem levar à maior biodisponibilidade de substâncias tóxicas para organismos aquáticos, portanto elevando a toxicidade.

Os resultados encontrados neste trabalho são consistentes com estudos de Zakaria *et al.* (2024), que também relataram maior sensibilidade em bioindicadores

aquáticos em condições de tratamento menos eficientes. Contudo, os valores de CE50 para *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* indicam que o esgoto pode atender a legislação, mesmo com o uso do lodo em uma etapa de tratamento primário do esgoto. Os resultados demonstraram que o esgoto tratado com a adição de lodo de ETA atende aos critérios estabelecidos pela Portaria nº 017/02 – Ecotoxicidade do Instituto do Meio Ambiente (IMA), reforçando a viabilidade ambiental do uso do lodo de ETA como auxiliar de coagulação e floculação em ETEs.

No entanto, o CE50 superior a 80% em quase todos os testes sugere que, em geral, o lodo tratado é viável para uso em ETEs no tratamento primário, indicando ainda a necessidade de outras etapas de tratamento do esgoto para atendimento a padrões de lançamento. A baixa toxicidade observada para *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* em grande parte dos testes reforça a viabilidade ambiental do reaproveitamento de lodo de ETA (Bernegossi *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2024).

3.4 Considerações Finais

Este estudo demonstrou que a incorporação de lodo de ETA no tratamento de esgoto bruto pode ser uma alternativa viável e ambientalmente segura, desde que sejam realizados ajustes adequados nas condições operacionais. Esses resultados além de evidenciar o potencial do lodo de ETA como uma alternativa para reduzir a dependência de coagulantes comerciais, promovem uma solução economicamente vantajosa para estações de tratamento de esgoto, apresenta um destino alternativo para o lodo de ETA, causador de grandes custos operacionais, principalmente quando destinados para disposição em aterros industriais.

A toxicidade residual, avaliada por meio de ensaios ecotoxicológicos utilizando *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri*, destacou a necessidade de controle rigoroso da dosagem de lodo e do tempo de sedimentação para garantir a segurança ambiental do efluente tratado. O controle operacional rigoroso não apenas assegura a qualidade do efluente tratado, mas também minimiza os riscos ecotoxicológicos associados a potenciais bioacumulações de compostos residuais no ambiente.

Assim, este estudo fornece subsídios importantes para o desenvolvimento de práticas operacionais eficientes, que promovam o reaproveitamento sustentável do lodo de ETA em estações de tratamento de esgoto, melhorando a eficiência do

tratamento do esgoto e contribuindo para a economia circular e a gestão integrada de resíduos.

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho apresentou uma contribuição importante para a pesquisa sobre o lodo de Estações de Tratamento de Água (ETA), ao realizar uma análise cienciométrica global pioneira no tema e investigar experimentalmente seu potencial de aplicação em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). A análise cienciométrica apontou para um aumento no número de publicações ao longo do tempo, evidenciando o crescente interesse científico em soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão desse resíduo. Esse crescimento, acentuado a partir de 2015, reflete o alinhamento da pesquisa acadêmica aos princípios da economia circular, com destaque para contribuições oriundas da Ásia, Oceania e América do Sul. Redes de coautoria destacaram Yaqian Zhao como pesquisador central, enquanto periódicos como *Journal of Environmental Management* e *Water Research* se consolidaram como os mais influentes na área.

A análise cienciométrica revelou lacunas importantes no conhecimento, como a necessidade de investigações mais aprofundadas sobre o potencial de toxicidade do lodo de ETA quando utilizado como coagulante, além de sua capacidade para remover hormônios e outros contaminantes emergentes em sistemas de tratamento de esgoto. Paralelamente, os resultados experimentais destacaram a relevância de estudos em escalas maiores, como projetos piloto e sistemas industriais, que poderão validar os achados laboratoriais em cenários operacionais reais.

A parte experimental deste estudo demonstrou que a incorporação do lodo de ETA no tratamento de esgoto bruto é uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente segura, desde que sejam realizados ajustes operacionais adequados. A mistura de lodo de ETA mostrou-se eficaz na remoção de parâmetros físico-químicos, como turbidez, fósforo e alumínio, sem comprometer a eficiência do processo de tratamento primário. Contudo, os ensaios ecotoxicológicos com os bioindicadores *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* evidenciaram a necessidade de um controle rigoroso das condições operacionais, como a dosagem de lodo e o tempo de sedimentação, para garantir a segurança ambiental do efluente tratado.

Futuros trabalhos devem também diversificar os parâmetros analisados, incluindo poluentes como metais pesados, que podem influenciar tanto a eficiência do tratamento quanto os riscos ambientais associados. Também, análises longitudinais serão fundamentais para compreender os efeitos de longo prazo do uso do lodo de

ETA em ETEs, especialmente no que se refere à estabilidade dos parâmetros de qualidade do efluente tratado e ao acúmulo de resíduos no sistema.

Outra dimensão, é a investigação de variações regionais, considerando fatores como a origem da água tratada, o tipo de coagulante utilizado e as condições climáticas locais, que podem afetar a composição do lodo e sua eficiência como insumo no tratamento de esgoto. Tais estudos poderão consolidar o reaproveitamento do lodo de ETA como uma prática sustentável e segura, integrada à gestão de resíduos e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Conclui-se que este trabalho oferece subsídios técnicos importantes para a formulação de diretrizes operacionais que integrem eficiência ambiental e segurança técnica no manejo do lodo de ETA. Ao promover o avanço do conhecimento técnico e científico, este estudo contribui para consolidar o reaproveitamento do lodo de ETA como uma prática necessária na transição para a economia circular e no fortalecimento da gestão integrada de resíduos no setor de saneamento.

REFERÊNCIAS

ABDELRAHMAN, A. M. et al. Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics. **Water Research**, v. 235, p. 119920, 2023. DOI: 10.1016/j.watres.2023.119920.

ABNT. **NBR 12713:2022**. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia spp* (Crustacea, Cladocera). Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ABNT. **NBR 15411-3:2021**. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Vibrio fischeri* - Parte 3: Determinação de ecotoxicidade aguda com *Vibrio fischeri* em amostras sólidas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1-13, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.073.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 9, p. 1-12, 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-6166-1.

APHA; AWWA; WEF. **Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington**. 23th ed. 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/conama>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/conama>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BERNEGOSI, A. C. et al. A systematic review of the toxicity of water treatment sludge to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 57, n. 10, p. 1087-1103, 2022. DOI: 10.1080/10934529.2022.2060021.

BOUGRINE, O. et al. Promoting Results in Engineering. **Results in Engineering**, v. 23, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102426.

CARVALHO GOMES, S.; ZHOU, J. L.; LONG, G.; LI, W. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review.

Resources, Conservation and Recycling, v. 145, p. 148-159, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.032.

CHEN, W. et al. Fractal characteristics of alum sludge. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, e0130683, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0130683.

COSTA, T. R. A.; WEBER, O. B.; PESTANA, C. J.; CAPELO-NETO, J. Bioindicators evaluating water quality and environmental impacts of water treatment plant sludge. **International Journal of Environment and Sustainable Development**, v. 16, n. 1, p. 25–42, 2017. DOI: 10.1504/IJESD.2017.10001350.

DEMIRKOL, G. T. et al. Determination on inhibition effects of coagulants used in wastewater treatment plants on anaerobic digester. **Water Science and Technology**, v. 82, n. 9, p. 1877–1884, 2020. DOI: 10.2166/wst.2020.439.

FANTASIA, A.; LAKHAL, E. K.; IDLIMAM, A. Thermodynamic analysis and mathematical modeling of residual sludge from drinking water treatment plants. **Ecological Engineering Journal**, v. 23, n. 2, p. 140–149, 2022. DOI: 10.12911/22998993/144421.

GUAN, X. H.; SHANG, C.; YU, S. M.; CHEN, G. H. Exploratory study on the reuse of alum sludge from water treatment works to improve primary sewage treatment. **Water Supply**, v. 4, n. 1, p. 159-164, 2003. DOI: 10.2166/ws.2003.0005.

HAIPING, Y.; ZHU, N. Progress in enhancing the dewaterability of residual activated sludge: Influencing factors, conditioning technologies, implications, and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 168605, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168605.

HE, Z. et al. Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials: A review. **Science of the Total Environment**, v. 926, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171513.

HEIL, D. M.; BARBARICK, K. A. Water Treatment Sludge Influence on the Growth of Sorghum-Sudangrass. **Journal of Environmental Quality**, v. 18, n. 3, p. 292-298, 1989. DOI: 10.2134/jeq1989.00472425001800030010x.

HUA, T.; HAYNES, R. J.; ZHOU, Y.-F. Competitive adsorption and desorption of arsenate, vanadate, and molybdate onto the low-cost adsorbent materials alum water treatment sludge and bauxite. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 34053-34062, 2018. DOI: 10.1007/s11356-018-3301-7.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html>. Acesso em: 22 dez. 2024.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA (IMA). **Portaria nº 017/02 – Ecotoxicidade. Estabelece normas para avaliação de ecotoxicidade de**

efluentes. Santa Catarina: IMA, 2002. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

KADA, I.; EL FELLAH, I.; RABIE, F.A.; AMMARI, M.; BOUGRINE, O.; LANJRI, A. F.; ALLAL, L. B. Advancing circular economy: A study of drinking water sludge for potential uses. **Results Engineering**, v. 23, n. 102426, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102426

KANG, C.; ZHAO, Y.; TANG, C.; ADDO-BANKAS, O. Use of aluminum-based water treatment sludge as coagulant for animal farm wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 46, 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102645.

KULDEYEV, M.; MATEUS, G.; RODRIGUES, F. Treatment plant as reagent for phosphate removal from waters. **Journal of Environmental Science**, v. 45, n. 3, p. 123–135, 2023. DOI: 10.1016/j.jes.2023.01.015.

LI, J.; KULANDAIVELU, J.; MUELLER, J. F.; WANG, C. et al. Removal of organic micropollutants from wastewater by discharge of drinking water treatment sludge into sewers. **Water Research, Elsevier**, v. 2020, p. 115945, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115945.

LIKUS, M.; KOMOROWSKA-KAUFMAN, M.; PRUSS, A.; ZYCH, L.; BAJDA, T. Iron-based water treatment residues: phase, physicochemical characterization and textural properties. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 3938, 2021. DOI: 10.3390/ma14143938.

LUA, E. M.; NGUYEN, M. D.; MILNE, N. A.; SURAPANENI, A.; THOMAS, M. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of environmental technology and innovation: A circular economy approach. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, n. 102651, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102651

MATOS, M. P. de et al. Modeling the progression of BOD obtained during the incubation of domestic sewage under different temperatures. **Sanitary and Environmental Engineering**, v. 22, n. 5, p. 821–828, 2017. DOI: 10.1590/s1413-41522017160535.

MARGUTI, A. L.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. Full-scale effects of addition of sludge from water treatment stations into processes of sewage treatment by conventional activated sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 215, p. 283–293, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.

MORA-LEÓN, A. G.; CASTRO-JIMÉNEZ, C. C.; SALDARRIAGA-MOLINA, J. C.; GARCÍA A., E. F.; CORREA-OCHOA, M. A. Aluminum recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 346, p. 131229, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131229.

MOUSAVI, S. A.; NAYERI, D. A comprehensive review on recovery and reuse of coagulants from drinking water treatment sludge. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115649, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115649.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. Use of WTP sludge in UASB systems for phosphorus removal. **Environmental Technology**, v. 36, n. 3, p. 307–314, 2015. DOI: 10.1080/09593330.2014.940897.

NGUYEN, M. D. et al. Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of Environmental Technology & Innovation: Circular Economy. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, p. 102651, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102651.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Guidelines for drinking-water quality**. 4th ed. Geneva: WHO, 2017.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M.; COSTA, C. A. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting Finder and Rankin. **Quality and Quantity**, v. 57, p. 1–40, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01562-y>

PEI, H.; WANG, Y.; LI, H.; MA, C.; JIN, Y. High-throughput sequencing reveals microbial communities in drinking water treatment sludge, including toxic cyanobacteria and potential pathogens. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 769–779, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.008

RAMADAN, H.; EL SAYED, A. E. A. Optimization of alum recovery from water treatment sludge: a case study—Samannoud Water Treatment Plant, Egypt. **Water and Environment Journal**, v. 34, n. 3, p. 464–473, 2020. DOI: 10.1111/wej.12481.

RAMTEKE, Pramod W.; SAGAR, Alka; SINGH, M. P. Assessment of wastewater toxicity by *Vibrio fischeri* bioassay. **International Journal of Ecology and Environmental Sciences**, v. 45, n. 1, p. 15–17, 2019.

RANJBAR, L.; ESLAMI, A.; YAZDANBAKHSH, A.; SAGHI, M. H. Evaluation of the toxicity of water treatment sludge from Tehran using bioassay tests. **Toxin Reviews**, 2017. DOI: 10.1080/15569543.2017.1312453

REIS, J. B.; LEVANDOSKI, W. M. K.; KROGEL, M.; FERRAZZO, S. T.; PASQUALI, G. D. L.; KORF, E. P. Technological characterization and environmentally friendly possibilities for the reuse of water treatment sludge in construction materials. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 59, n. 5, p. 241–250, 2024. DOI: 10.1080/10934529.2024.2367353.

REN, B.; YUAN, Q.; ZHU, G.; ZHANG, P.; HURSTHOUSE, A. Recycling of residual sludges: Preparation and application of sludge-based activated carbon. **International Journal of Polymer Science**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8320609>.

SCALIZE, P.; ALBUQUERQUE, A.; DI BERNARDO, L. Impact of Alum Water Treatment Residues on the Methanogenic Activity in the Digestion of Primary Domestic Wastewater Sludge. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 8783, 2021. DOI: 10.3390/su13168783

SHARMA, S.; AHAMMED, M. M. Application of modified water treatment residues in water and wastewater treatment: A review. **Heliyon**, v. 9, n. 5, e15796, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15796.

SHENG, L.; YUNQING, L.; XU, J.; WANG, H. Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 287, p. 112374, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112374.

SOTERO-SANTOS, R. B.; ROCHA, O.; POVINELLI, J. Evaluation of the toxicity of water treatment plant sludges using the Daphnia bioassay. **Water Research**, v. 39, n. 17, p. 3909-3917, 2005. DOI: 10.1016/j.watres.2005.06.030.

SOUZA, A. C. Z. et al. Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludge. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 7, p. 3527-3552, 2024. DOI: 10.1007/s13762-023-05338-1.

SZARA, M.; BARAN, A.; KLIMKOWICZ-PAWLAS, A.; TARNAWSKI, M. Ecotoxicological and chemical properties of bottom sediment from the Rożnów reservoir amended with various waste materials. **Journal of Environmental Management**, v. 273, n. 111176, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111176

TURNER, T.; WHEELER, R.; STONE, A. et al. Potential Alternative Reuse Pathways for Water Treatment Residuals: Remaining Barriers and Questions—a Review. **Water Air Soil Pollut**, v. 230, n. 227, 2019. DOI: 10.1007/s11270-019-4272-0

VERRELLI, D. I.; DIXON, D. R.; SCALES, P. J. Effect of coagulation conditions on the dewatering properties of sludges produced in drinking water treatment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 2009. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.06.023.

WU, H.; DU, H.; LU, Y.; ROSADI, M. Y. Effect of adding drinking water treatment sludge in activated sludge digestion processes. **Sustainability**, v. 12, n. 6953, p. 1–15, 2020. DOI: 10.3390/su12176953.

YAZDANI, M.; EBRAHIMI-NIK, M.; HEIDARI, A.; ABBASPOUR-FARD, M. H. Improvement of biogas production from slaughterhouse wastewater using biosynthesized iron nanoparticles from drinking water treatment sludge. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1340–1351, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.09.065.

YU, C.; ROH, H.-S.; CHU, K.-H. 17 β -estradiol-degrading bacteria isolated from activated sludge. **Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 486-492, 2007. DOI: 10.1021/es060746q.

YUAN, H.; ZHU, N. Progress in enhancing dewaterability of waste activated sludge: influencing factors, conditioning technologies, implications and perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 912, p. 168605, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168605.

ZAINOL, N. A.; RASHID, N. A.; MAKHTAR, S. M. Z.; KHALILULLAH, P. A. B.; GHANI, A. A. Turbidity removal from synthetic kaolin wastewater using water treatment sludge as a coagulant. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 14, n. 9, p. 222-231, 2022. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.09.028>.

ZAKARIA, S. N. F.; ABDUL AZIZ, H.; HUNG, Y.-T.; WANG, M.-H. S.; WANG, L. K. **Treatment of hazardous sludge from water and wastewater treatment plants**. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y.-T. (Eds.). *Industrial Waste Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2024. p. 1–41. DOI: 10.1007/978-3-031-46747-9_1.

ZHOU, Y.; HAYNES, R. J. Sorption of heavy metals by inorganic and organic components of solid wastes: Significance to use of wastes as low-cost adsorbents and immobilizing agents. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 11, p. 909-977, 2010. DOI: 10.1080/10643380802513365.

ZHOU, Z.; YANG, Y.; LI, X.; GAO, W.; LIANG, H.; LI, G. Coagulation efficiency and floc characteristics of recycling sludge during low-temperature and micro-polluted water treatment. **Journal of Environmental Sciences**, v. 24, n. 6, p. 1014–1020, 2012. DOI: 10.1016/S1001-0742(11)60866-8.

APÊNDICE A - Portfólio de Artigos

Article	FI	Year	Ci	InOrdinatio
Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept	15,8	2016	427	621,92
Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review	14,5	2019	221	506,75
Sorption of Heavy Metals by Inorganic and Organic Components of Solid Wastes: Significance to Use of Wastes as Low-Cost Adsorbents and Immobilizing Agents	18,2	2010	291	357,58
The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater	15,8	2015	194	340,16
Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks	14,7	2009	310	321,01
Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment: A review	11,4	2021	79	307,55
A sludge and modified rice husk ash-based geopolymer: synthesis and characterization analysis	15,8	2019	93	306,42
Preparation of a new low-cost substrate prepared from drinking water treatment sludge (DWTS)/bentonite/zeolite/fly ash for rapid phosphorus removal in constructed wetlands	15,8	2020	70	292,74
Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant	11,4	2016	166	287,92
17 β -estradiol-degrading bacteria isolated from activated sludge	14,8	2007	283	282,85
Efficient adsorption of heavy metals from wastewater on nanocomposite beads prepared by chitosan and paper sludge	14,1	2022	41	275,04
Hydrogen peroxide and persulfate activation using UVA-UVB radiation: Degradation of estrogenic compounds and application in sewage treatment plant waters	14,7	2021	52	273,05
Biochemical Mechanisms and Catabolic Enzymes Involved in Bacterial Estrogen Degradation Pathways	13,6	2017	117	273,04
Feasibility of sulfide control in sewers by reuse of iron rich drinking water treatment sludge	18	2015	98	266,16
Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using Response Surface Methodology	11,4	2018	107	258,96
Improvement of biogas production from slaughterhouse wastewater using biosynthesized iron nanoparticles from water treatment sludge	13,6	2019	76	256,09
A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge	11,4	2022	39	241,37
Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy		2022	73	240,70
Use of industrial wastes as media in constructed wetlands and filter beds - Prospects for removal of phosphate and metals from wastewater streams	18,2	2015	70	240,16
Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment	14,7	2009	169	232,89
Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution	10,9	2007	263	232,74
Assessing the removal of organic micropollutants from wastewater by discharging drinking water sludge to sewers	18	2020	29	232,74
Performance of Recovered Coagulant from Water Treatment Sludge by Acidification Process	0,5	2022	67	225,70
Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay	18	2005	122	216,00
Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal	10,3	2017	94	211,29

Development and characterization of a controlled low-strength material produced using a ternary mixture of Portland cement, fly ash, and waste water treatment sludge	15,8	2022	16	208,70
High-throughput sequencing reveals microbial communities in drinking water treatment sludge from six geographically distributed plants, including potentially toxic cyanobacteria and pathogens	14,1	2018	52	207,39
Redox transformations of arsenic and iron in water treatment sludge during aging and TCLP extraction	14,8	2001	213	206,49
Practical application of PAC sludge-valorized biochars to the mitigation of methyl arsenic in wetlands	19,4	2022	4	204,70
Aluminum leaching from water treatment sludge using hydrochloric acid and kinetic study	6,6	2020	70	200,74
Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment	6,7	2011	211	200,61
Aluminium recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater	15,8	2022	13	198,70
Valorization of alum sludge via a pyrolysis platform using CO ₂ as reactive gas medium	17,1	2019	19	196,09
Microbial transformation of synthetic estrogen 17 α -ethinylestradiol	12,7	2009	134	191,01
Aerosol exposure and risk assessment for green jobs involved in biomethanization	17,1	2018	19	190,25
Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials	13,5	2006	148	189,21
Fate of cyanobacteria and their metabolites during water treatment sludge management processes	14,1	2012	80	186,75
Low cost and eco-friendly building materials derived from wastes: Combined effects of bottom ash and water treatment sludge	10,6	2022	25	186,70
An eco-friendly and low-cost strategy for groundwater defluorination: Adsorption of fluoride onto calcinated sludge	7,7	2020	57	185,74
Reuse of UK alum water treatment sludge in cement-based materials	10,6	2021	33	184,55
Assessing dewatering performance of drinking water treatment sludges	18	2010	34	184,25
A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil	15,8	2023	5	181,68
Use of aluminum-based water treatment sludge as coagulant for animal farm wastewater treatment	7,2	2022	33	179,37
Investigation on removal of perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorohexane sulfonate (PFHxS) using water treatment sludge and biochar	11,7	2023	12	175,68
Properties of alkali-activated controlled low-strength material produced with waste water treatment sludge, fly ash, and slag	10,6	2017	60	171,79
Estrogen degraders and estrogen degradation pathway identified in an activated sludge	7,8	2018	71	171,53
Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater	5,5	2018	87	171,39
Simultaneous modelling of coagulant recovery and reuse by response surface methodology	11,4	2021	24	170,05
Multiple environmental risk assessments of heavy metals and optimization of sludge dewatering: Red mud-reed straw biochar combined with Fe ²⁺ activated H ₂ O ₂	11,4	2022	17	168,04
Low dietary levels of Al, Pb and Cd may affect the non-enzymatic antioxidant capacity in caged honey bees (<i>Apis mellifera</i>)	11,7	2016	55	167,58
Phosphate removal using thermally regenerated Al adsorbent from drinking water treatment sludge	9,5	2021	30	166,05
Coagulation/flocculation process for dye removal using water treatment residuals: modeling through artificial neural networks	1,7	2016	142	164,25
Recycling drinking water treatment sludge in construction and building materials: A review	14,1	2024	2	161,00

Use of water treatment plant sludge in high-rate activated sludge systems: A techno-economic investigation	14,1	2023	4	159,68
Effects of ultrasound pretreatment on the characteristic evolutions of drinking water treatment sludge and its impact on coagulation property of sludge recycling process	14,1	2015	28	157,16
Geochemical modeling of arsenic and selenium leaching in alkaline water treatment sludge from the production of non-ferrous metals	14,7	2008	53	157,12
Coagulation efficiency and flocs characteristics of recycling sludge during treatment of low temperature and micro-polluted water	11,1	2012	80	156,75
Rice husk templated water treatment sludge as low cost dye and metal adsorbent	11,3	2017	41	155,04
Ecotoxicological and chemical properties of the roznów reservoir bottom sediment amended with various waste materials	11,4	2020	21	150,74
Trace analysis of parabens preservatives in drinking water treatment sludge, treated, and mineral water samples	6,6	2018	62	146,68
Investigation of water treatment sludge from drinking water treated with Zetafloc 553 I coagulant for phosphorus removal from wastewater	11,4	2021	14	145,05
Unraveling the 17 β -Estradiol Degradation Pathway in <i>Novosphingobium tardaugens</i> NBRC 16725	8,2	2020	34	144,74
Removal of fluoride in aqueous solution by adsorption on acid activated water treatment sludge	12,1	2010	63	144,58
Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices	10,6	2018	32	143,82
Performance evaluation of Fe-based water treatment sludge for dewatering of iron ore tailings slurry using coagulation-flocculation process: Optimization through response surface methodology	11,4	2022	9	141,37
Use of ballasted flocculation (BF) sludge for the manufacturing of lightweight aggregates	11,4	2022	9	141,37
Phosphorous removal from aqueous solution can be enhanced through the calcination of lime sludge	11,4	2017	29	141,04
Phosphorus sorption and recovery using mineral-based materials: Sorption mechanisms and potential phytoavailability	6,2	2013	111	140,03
Life cycle assessment of management/valorisation practices for metal-sludge from treatment of acid mine drainage	7,6	2023	13	139,68
Ceramic adsorbent material in removing reactive blue bf 5G dye from synthetic wastewater	10,9	2024	3	139,00
Removal of Pb(II), Cr(III) and Cr(VI) from aqueous solutions using alum-derived water treatment sludge	3,8	2011	164	138,04
Wastewater post-coagulation sludge recycled as a multifunctional adsorbent via pyrolysis enhanced in carbon dioxide (CO ₂)	11,7	2022	7	137,70
Potential use of two filter media in constructed wetlands for simultaneous removal of As, V and Mo from alkaline wastewater - Batch adsorption and column studies	11,4	2018	22	137,53
Recovery of aluminum from water treatment sludge for phosphorus removal by combined calcination and extraction	11	2021	12	136,05
Turbidity removal from synthetic turbid water using coagulant recovered from water treatment sludge: A potential method to recycle and conserve aluminium	7,3	2022	19	133,70
Identification and quantification of microplastic particles in drinking water treatment sludge as an integrative approach to determine microplastic abundance in a freshwater river	12,7	2021	2	128,05
Evaluation of copper removal efficiency using water treatment sludge	5,2	2019	49	127,09
Reuse of aluminium-based water treatment sludge for phosphorus adsorption: Evaluating the factors affecting and correlation between adsorption and sludge properties	5,7	2022	21	124,37
The potential reuse of drinking water treatment sludge for organics removal and disinfection by-products formation control	7,7	2022	15	124,37
Development of a floating adsorbent for cadmium derived from modified drinking water treatment plant sludge	5,7	2019	43	122,09

Sludge quantification at water treatment plant and its management scenario	4,5	2017	69	122,04
Characteristics of organic matter released from drinking water treatment sludge under different storage conditions: Evaluation based on activated carbon adsorbability	11,7	2023	1	120,68
Recycling of Waste Sludge: Preparation and Application of Sludge-Based Activated Carbon	4,6	2018	56	118,11
Evaluation of combined thermo-chemical processes for the treatment of landfill leachate using virgin and recovered FeCl ₃ coagulants	11,4	2023	1	117,68
Arsenic leachability and speciation in cement immobilized water treatment sludge	11,7	2005	50	117,00
Water treatment sludge for phosphate removal from the effluent of UASB reactor treating municipal wastewater	9,9	2015	29	116,16
Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water	7,9	2020	21	115,74
Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties	5,7	2021	25	115,55
Study of the potential of water treatment Sludges in the removal of emerging pollutants	5,9	2021	24	115,05
Phosphorus adsorption and organic release from dried and thermally treated water treatment sludge	9,5	2023	4	113,68
Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using Response Surface Methodology	11,4	2018	4	111,82
Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrine disruptors	7,7	2022	11	111,04
Study on the feasibility and stability of drinking water treatment sludge (DWTS)@zeolite to remove phosphorus from constructed wetlands	7,7	2022	11	111,04
Investigation on the suitability of aluminium-based water treatment sludge as a sustainable soil replacement for road construction	2,7	2023	17	110,68
Chemically enhanced primary treatment of sewage using the recovered alum from water treatment sludge in a model of hydraulic clari-flocculator	7,2	2017	38	110,29
Effect of pH conditions on actual and apparent fluoride adsorption by biochar in aqueous phase	3,8	2012	112	108,36
Controlled release of phosphorus using lanthanum-modified hydrochar synthesized from water treatment sludge: Adsorption behavior and immobilization mechanism	7,2	2022	11	106,04
Process engineering approach to conversion of alum sludge and waste glass into zeolite LTA for water softening	7,2	2021	15	105,55
Establishment of restoration trajectories for upland tundra communities on diamond mine wastes in the Canadian arctic	5,7	2014	65	102,93
Carbon paste electrode modified with Al- and Si-rich water treatment sludge for Bisphenol-A detection	7,7	2022	8	101,04
Recycling of bottom sediment to agriculture: effects on plant growth and soil properties	6	2023	8	98,68
Synthesis of LTA zeolite beads using alum sludge and silica rich wastes	7,5	2021	10	96,05
High-performance removal of anti-inflammatory using activated carbon from water treatment plant sludge: fixed-bed and batch studies	5,6	2023	8	94,68
Application of modified water treatment residuals in water and wastewater treatment: A review	4	2023	11	93,68
Effect of coagulation conditions on the dewatering properties of sludges produced in drinking water treatment	7	2009	67	92,14
Partitioning and transformation behavior of Cd(II) and As(V) during As(V)-Cd(II)-Fe(III) coprecipitation: Effect of aging under aerobic conditions at pH 5 and 11 relevant to tailings and acid waste	7,3	2023	4	91,68
Dairy wastewater treatment using water treatment sludge as coagulant: a novel treatment approach	4,4	2018	37	88,96
Utilization of biochar impregnated with anaerobically digested slurry as slow-release fertilizer	4,9	2014	57	87,66

Competitive adsorption and desorption of arsenate, vanadate, and molybdate onto the low-cost adsorbent materials alum water treatment sludge and bauxite	6,6	2018	20	86,68
Recycling of iron and silicon from drinking water treatment sludge for synthesis of magnetic iron oxide@SiO ₂ composites	6,6	2016	27	85,47
Preparation of biological activated carbon (BAC) using aluminum salts conditioned sludge cake for the bio-refractory organic contaminants removal from anaerobically digested liquor	7	2019	13	85,09
Fate of estrogens in a pilot-scale step-feed anoxic/oxic wastewater treatment system controlling by nitrogen and phosphorus removal	6,6	2018	18	83,82
Photocatalytic degradation of Rhodamine-B dye using composite prepared from drinking water treatment sludge and nano TiO ₂	2,3	2022	19	83,70
Successful plant growth in acid mine drainage-impacted soil using pot-based experiments with waste amendments	8,2	2024	0	82,00
Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporating a coagulant	6,8	2008	58	81,07
Chemical and plant tests to assess the viability of amendments to reduce metal availability in mine soils and tailings	6,6	2016	22	79,92
Removal of Al, Ga, As, V and Mo from alkaline wastewater using pilot-scale constructed wetlands	6,6	2019	10	76,09
Sorption properties of groundwater treatment residuals containing iron oxides	7,7	2023	0	75,68
Photochemical degradation of halogenated estrogens under natural solar irradiance	7,2	2018	8	75,53
Analysis of the Mechanism of Acid Mine Drainage Neutralization Using Fly Ash as an Alternative Material: A Case Study of the Extremely Acidic Lake Robule in Eastern Serbia	4,8	2022	9	75,37
A comparison of inorganic solid wastes as adsorbents of heavy metal cations in aqueous solution and their capacity for desorption and regeneration	3,8	2011	76	75,18
Resource recovery of wastewater treatment sludge: Synthesis of a magnetic cancrinite adsorbent	5,9	2019	13	74,09
Fe recovery from drinking water treatment sludge for reuse in tannery wastewater treatment: Machine learning and statistical modelling	7,2	2024	0	72,00
Evaluation of Dewatering Performance and Fractal Characteristics of Alum Sludge	5,6	2015	27	71,16
Sludge Management at the Krakow-Plaszow WWTP-Case Study	5	2022	7	70,70
Effect of ion exchange dialysis process variables on aluminium permeation using response surface methodology	5,5	2020	10	69,74
Comparative study of sediment phosphorus immobilization via the addition of lanthanum-modified and thermal-modified drinking water treatment sludge	6,6	2023	1	69,68
Effect of addition of surface water treatment sludge to biomass in biochar porosity	7,4	2019	1	69,09
Content and fractionation of heavy metals in water treatment sludges	5,8	1990	192	68,12
A systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges	3,7	2022	10	67,70
Adsorption of methylene blue using modified adsorbents from drinking water treatment sludge	3,4	2016	39	66,81
Effect of Adding Drinking Water Treatment Sludge on Excess Activated Sludge Digestion Process	5	2020	11	66,74
Stabilization of High-Organic-Content Water Treatment Sludge by Pyrolysis	5	2018	17	66,39
Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges	5,6	2024	1	66,00
Iron-based water treatment residuals: Phase, physicochemical characterization, and textural properties	4,7	2021	9	65,55
Adsorption of Congo red and tetracycline onto water treatment sludge biochar: characterisation, kinetic, equilibrium and thermodynamic study	3,4	2022	10	64,70

Comparative Study on Removal of Textile Dyes in Aqueous Medium by Adsorption Using Modified Drinking Water Treatment Sludge	4,4	2022	7	64,70
Use of alum water treatment sludge to stabilize C and immobilize P and metals in composts	6,6	2015	10	64,16
Biofilm development dynamics and pollutant removal performance of ceramsite made from drinking-water treatment sludge	3,4	2019	22	64,09
Influence of sludge characteristics on coagulant recovery from water treatment sludge: a preliminary study	5,3	2017	16	63,79
Biodegradability of water treatment sludge influenced by sewage sludge, focusing its use in agriculture as soil conditioner	5,6	2022	3	63,37
Performance comparison of three methods for detection of Giardia spp. cysts and Cryptosporidium spp. oocysts in drinking-water treatment sludge	4,5	2018	18	62,82
Aluminium migration through a geosynthetic clay liner	7	2007	27	62,63
Oxidation to Control Cyanobacteria and Cyanotoxins in Drinking Water Treatment Plants: Challenges at the Laboratory and Full-Scale Plants	4,8	2022	5	62,04
Electrolysis using Pt/SS electrodes for aluminum recovery from drinking water treatment sludge	5,3	2020	7	61,74
Optimization of cationic dye removal using a high surface area-activated carbon from water treatment sludge	2,5	2021	16	61,05
Primary Treatment of Domestic Wastewater with the Use of Unmodified and Chemically Modified Drinking Water Treatment Sludge	5	2022	4	60,70
Using waste to treat waste: clean production of erdite/zeolite composite flocculant from groundwater treatment sludge for real electroplating wastewater treatment	6,2	2023	0	60,68
Characteristics of pellet-type adsorbents prepared from water treatment sludge and their effect on trimethylamine removal	5,1	2014	24	59,66
Use of inorganic wastes as immobilizing agents for soluble P in green waste-based composts	6,6	2012	12	59,44
Sustainable reuse of groundwater treatment iron sludge for organic matter removal from river Neris water	5	2019	9	58,42
Removal of Dyes from Water Using Aluminum-Based Water Treatment Sludge as a Low-Cost Coagulant: Use of Response Surface Methodology	4,8	2024	1	58,00
Evaluation of sludge handling using acidification and sequential aluminum coagulant recovery: Case study of El-sheikh zayed WTP	4,7	2017	16	57,79
The properties of sludge formed as a result of coagulation of backwash water from filters removing iron and manganese from groundwater	2,7	2019	21	55,42
Polyaluminium Chloride and Anionic Polyacrylamide Water Treatment Residuals as an Amendment in Soils for Phosphorus: Implications for Reuse in Stormwater Bioretention Systems	3,8	2022	6	55,37
Extraction method for total microcystins in cyanobacteria-laden sludge	5,5	2014	14	54,57
A comparison of water treatment sludge and red mud as adsorbents of As and Se in aqueous solution and their capacity for desorption and regeneration	3,8	2012	42	54,52
Waste management strategies for cleaner recycling of spent batteries: lead recovery and brick production from slag	5,6	2019	3	54,42
Beneficial metal stabilization mechanisms using simulated sludge incineration ash for ceramic products	6,1	2014	7	54,21
Investigation of water treatment sludge for the treatment of saline water: Batch studies	4	2023	3	53,68
Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using water treatment sludge modified with sodium alginate as a low cost adsorbent	3,4	2017	23	53,54
Optimization, modeling, and characterization of water treatment sludge modified by ultrasound-assisted acid activation for enhancing of turbidity removal	4,4	2021	5	52,55
Chemical Activation of Sludge from Drinking Water Treatment Plant for Adsorption of Methylene Blue Dye	3,8	2023	3	51,68

Experimental Study on the Application of Sludge from Water Treatment Plant as a Reagent for Phosphate Removal from Wastewater	4,8	2023	1	51,68
Chemical fractionation of heavy metals and nutrients in sludge and waste water generated by Coca-Cola soft drink industry	5,3	2015	10	51,16
Toxicity assessment of Tehran water treatment sludges using bioassay tests	4,1	2018	12	50,25
Beneficial Use of Water Treatment Sludge with Stabilizers for Application in Road Pavements	5	2024	0	50,00
Treatment of domestic wastewater containing phosphate using water treatment sludge through UASB-clariflocculator integrated system	4,4	2020	5	48,74
Water treatment sludge influence on the growth of sorghum-sudangrass	5,8	1989	131	48,34
Reuse of aluminum-based water treatment sludge to immobilize a wide range of phosphorus contamination: Equilibrium study with different isotherm models	4,4	2007	48	48,30
Adsorption of Eriochrome Black T on Pseudo Boehmite and Gamma Alumina Synthesized from Drinking Water Treatment Sludge: A Waste-to-Recycling Approach	4,8	2024	0	48,00
A two-prong approach of beneficial reuse of alum sludge in engineered wetland: First experience from Ireland	5,1	2010	22	47,25
Occurrence and Degradation of Free and Conjugated Estrogens in a River Receiving Feedlot Animal Discharge	3,7	2022	3	44,37
Recovery of alum from Surabaya water treatment sludge using electrolysis with carbon-silver electrodes	2,4	2019	16	44,09
Scaling-up Studies on Electrolysis Using Cation Exchange Membrane for Alum Recovery	4,5	2021	1	43,55
Optimization of alum recovery from water treatment sludge-case study: Samannoud water treatment plant, Egypt	2,9	2020	9	41,74
Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study	0,9	2022	10	39,70
Phosphorus recovery from sewage with a sustainable and low-cost treatment system	3,4	2019	7	39,09
Application of Thermally Treated Water Treatment Sludge as a Remarkable Adsorbent Towards Emerging Pollutant Removal from Aqueous Solution	3,8	2021	2	39,05
A parametric study of alum recovery from water treatment sludge	3,4	2016	14	39,03
Advancing circular economy: A study of drinking water sludge for potential uses	3,9	2024	0	39,00
Potential use of water treatment sludge for the reclamation of small-capacity sludge collectors	3,9	2024	0	39,00
Biodegradation of Steroid Hormone Estriol by <i>Pseudomonas proteolytica</i> GBPI_Hb61, a Psychrotolerant Himalayan Bacteria	3,8	2024	0	38,00
Heavy Metal Adsorption by Dewatered Iron-Containing Waste Sludge	3,1	2018	10	37,39
Extending the use of dewatered alum sludge as a P-trapping material in effluent purification: Study on two separate water treatment sludges	3,7	2010	28	37,25
A Study of the Absorption of Nitrogen Oxides from the Boiler Flue Gases	1,5	2018	21	37,11
Technological characterization and environment-friendly possibilities to reuse water treatment sludge in building materials	3,7	2024	0	37,00
The ability of drinking water treatment sludge to degrade methylene blue in water through combined adsorption/photo Fenton-like process	3,7	2023	0	35,68
The impact of recycling polyaluminium chloride and anionic polyacrylamide water treatment residuals on heavy metal adsorption in soils: implications for stormwater bioretention systems	3,4	2024	0	34,00
Fabrication of porous mullite-based ceramic bricks from Al-rich water treatment sludge and kaolinitic-based clay	3,5	2023	0	33,68
A study of dual polymer conditioning of aluminum-based drinking water treatment residual	3,7	2007	34	33,52
Recovery of alum sludge by using membrane-based electrochemical process	2,4	2020	7	32,74

Parametric study of coagulant recovery from water treatment sludge towards water circular economy	3,4	2023	0	32,68
Characterization and utilization of water treatment sludge for coagulation of raw water	3,4	2023	0	32,68
Detoxification of polluted marine sediments using water treatment sludge	3,7	2018	2	31,96
Reclamation of disturbed lands by means of technogenic water treatment sludge;	1,8	2020	9	30,74
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar;	3,1	2023	0	29,68
Integrated Wastewater Treatment for a GRES	1,5	2019	12	28,42
Adsorption of copper and lead, ions onto regenerated sludge from a water treatment plant	3,7	2004	37	28,30
Thermodynamic Analysis and Mathematic Modeling of Waste Sludge from Drinking Water Treatment Plants	2,4	2022	2	28,04
Identifying optimized conditions for developing dewatered alum sludge-based photocatalyst to immobilize a wide range of dye contamination	1,3	2022	5	27,04
Fabrication of humidity control ceramics from drinking-water treatment sludge and onggi soil	3,2	2016	5	27,03
Efficiency of dry drinking water treatment sludge as adsorbent for methylene blue and acid red 97 removal from aqueous solutions	1,7	2024	1	27,00
Water treatment sludge: a potential plant growth medium	4,8	1995	51	26,84
Synthesis and Photocatalytic Application of Drinking Water Treatment Sludge @ TiO ₂ Composite for Degradation of Methylene Blue Dye	1,9	2020	6	25,74
Orthophosphate removal from aqueous solutions using drinking-water treatment sludge	3,4	2013	7	25,36
Agronomic effects of land application of water treatment sludges	1,7	1991	170	23,58
Engineering behavior of water treatment sludge	3,3	1992	101	21,50
Adsorption efficiency of alkali-modified water treatment sludge for ammonia nitrogen in water	3,1	2014	3	20,57
Integration of water treatment sludge and agriculture waste as low-cost adsorbent for remazol red dye removal	1,7	2021	3	20,55
Integration of water treatment sludge and agriculture waste as low-cost adsorbent for Remazol red dye removal	1,7	2021	3	20,55
Turbidity Removal from Kaolin Synthetic Wastewater via Coagulation Process Using Sludge from Water Treatment Plant	1,6	2022	2	20,04
Constructed wetlands using aluminium-based drinking water treatment sludge as P-removing substrate: Should aluminium release be a concern?		2011	51	19,32
Phosphorus immobilisation in al-drinking water treatment sludge (AL-DWTS) and soil under laboratory conditions	3,1	2010	10	19,25
Arsenic and antimony removal by using thermal modified treatment plant sludge in a fixed bed column;	1,5	2023	1	18,68
Siloxanes removal from biogas using activated carbon	1,5	2017	10	18,29
Potential of silica from water treatment sludge modified with chitosan for Pb(II) and color adsorption in sasirangan waste solution	1	2022	3	17,37
Adsorption Drying of Natural Gas by Carbonate Sludge		2019	14	16,75
Acidic and hydrogen peroxide treatment of polyaluminum chloride (PACL) sludge from water treatment	3,4	2004	19	16,73
Effects Of Lime-sludge Discharge On An Arctic River	5,8	1992	2	16,50
Scientific approaches in the technology of purification of Gas emissions from sulfur oxide at industrial enterprises	1,5	2021	2	16,05
Water Treatment Sludge As Potential Soil Amendment For Native Plants Of The Brazilian Cerrado	1,8	2018	4	15,82
Modeling of Co(II) adsorption by artificial bee colony and genetic algorithm	1,9	2018	3	15,39

Effective Removal of Fe(III) Ions from Water Sample Using Activated Drinking Water Treatment Sludge: Isotherms and Kinetic Studies	1,6	2023	0	14,68
Study on adsorption of phosphorus by modified aluminum-based drinking water treatment sludge	1,7	2019	2	13,75
Study on adsorption of phosphorus by modified aluminum-based drinking water treatment sludge	1,7	2019	2	13,75
Influence of mixing conditions on coagulant recovery efficiency and quality	1,5	2023	0	13,68
Complex use of waste in wastewater and circulating water treatment from oil in heat power stations	1,5	2017	6	13,29
Formulation Of Composite Beads Alginate/Hydroxide Sludge For The Removal Of Dyes From Aqueous Solutions	1,8	2019	1	13,09
Bioindicators assessing water quality and environmental impacts of water treatment plant sludge	1,4	2017	5	11,04
Phosphate removal from wastewater by using water treatment sludge	1,7	2019	0	10,42
Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation;	1	2023	0	8,68
A Comparison Study of Alum Sludge and Ferric Hydroxide Based Adsorbents for Arsenic Adsorption from Mine Water;	0,7	2021	2	8,05
Drinking-Water-Treatment Wastes as Sorption Materials for Purifying Aqueous Environments from Pollution. Part 2. Aluminum-Containing Water-Treatment Sludge. A Review	0,9	2023	0	7,68
Phosphorus removal performance of novel ceramsite made from water treatment sludge and fly ash;	0,5	2018	7	7,11
Challenges Of Alum Recovery From Drinking Water Treatment Sludge Using Electrolysis Method;	1,1	2021	0	7,05
The Use of Energy Industry Waste as Sorption Material in the Purification of Reverse Osmosis Concentrate		2019	8	6,75
Turbidity Reduction and Eco-friendly Sludge Disposal in Water Treatment Plants	0,7	2023	0	5,68
Adsorption of ammonia nitrogen in aqueous solution by the acid activated water treatment sludge	1,3	2016	2	4,70
Handling the Sludge When Using Polyaluminum Chloride as a Coagulant in the Potable Water Treatment Process	0,7	2022	0	4,37
Use of nanofiltration membranes to concentrate and recover leached aluminum from acidified water treatment sludge	0,9	2016	4	2,92
Utilization of water treatment sludge in processes of oil recovery from aqueous media	2,1	2008	5	2,89
Assessment of performance and environmental friendliness of a sorbent-based remediation method for heavy metal and metalloid contaminated soils	0,4	2023	0	2,68

Fonte: Aatoria própria (2024).