

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

MARIA EDUARDA BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE BIOACUMULAÇÃO DE METAIS TÓXICOS EM ALFACE
(*LACTUCA SATIVA* L.) DESENVOLVIDA NA PRESENÇA DE LODOS
INDUSTRIAIS**

**RECIFE - PERNAMBUCO
2025**

MARIA EDUARDA BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE BIOACUMULAÇÃO DE METAIS TÓXICOS EM ALFACE
(*LACTUCA SATIVA* L.) DESENVOLVIDA NA PRESENÇA DE LODOS
INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Mestra*.
Orientador: Rosângela Gomes Tavares
Coorientadores: Patrícia Karla Batista de Andrade

**RECIFE - PERNAMBUCO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Lorena Teles – CRB-4 1774

A447e Almeida, Maria Eduarda Borges de.
Estudo de bioacumulação de metais tóxicos em
alface (*Lactuca sativa* L.) desenvolvida na presença
de lodos industriais / Maria Eduarda Borges de
Almeida. – Recife, 2025.
65 f.; il.

Orientador(a): Rosângela Gomes Tavares.
Co-orientador(a): Patrícia Karla Batista de
Andrade.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal
Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Alface - Efeito dos metais pesados. 2.
Alimentos - Toxicologia. 3. Resíduos industriais. I.
Tavares, Rosângela Gomes, orient. II. Andrade,
Patrícia Karla Batista de, coorient. III. Título

CDD 620.8

MARIA EDUARDA BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE BIOACUMULAÇÃO DE METAIS TÓXICOS EM ALFACE
(*LACTUCA SATIVA* L.) DESENVOLVIDA NA PRESENÇA DE LODOS
INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Mestra*.

APROVADA: 31 de janeiro de 2025.

Rosângela Gomes Tavares
Presidente da Banca e Orientadora

BANCA EXAMINADORA:

Ronaldo Faustino da Silva
Membro Externo – IFPE

Vicente de Paulo Silva
Membro Interno – UFRPE

*À minha mãe, exemplo de dedicação, coragem e
persistência.*

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha mãe por todo o apoio, incentivo e conselhos. Sou extremamente grata por todos os ensinamentos. Amo a senhora.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

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

À minha orientadora, Dra. Rosângela Gomes, pela compreensão e paciência.

À minha coorientadora, Dra. Patrícia Karla, pelos ensinamentos.

Aos professores da banca de avaliação, Dr. Ronaldo Faustino e Dr. Vicente de Paulo pelas contribuições.

Aos técnicos do Laboratório Multiusuário de Química Ambiental de Solos (LQAS) e do CENAPESQ – UFRPE.

Aos meus amigos e amigas sempre presentes, em especial Rayhonay, Elayni, Carol (spotify), Tainah, Emerson, Vitória, Elíada e Lee.

As novas amizades proporcionadas pelo programa, em especial Gean, Fabrynne, Geisa, Daniel, Vitor e Rafaela.

Aos estudantes de iniciação científica Vitória, Yasmin, Everton e Mariana.

Ao meu gato Mignon (*in memoriam*), querido companheiro.

As minhas sobrinhas, irmãos, tia Kina e familiares.

A todas as pessoas, que de alguma forma me ajudaram para a realização deste trabalho e não listadas acima.

Fico agradecida!

RESUMO

ALMEIDA, Maria Eduarda Borges de, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, janeiro de 2025. **Estudo de bioacumulação de metais tóxicos em alface (*Lactuca sativa* L.) desenvolvida na presença de lodos industriais.** Orientadora: Rosângela Gomes Tavares. Coorientadora: Patrícia Karla Batista Andrade.

A utilização de resíduos industriais na agricultura tem sido amplamente estudada como uma alternativa sustentável para minimizar impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado e para promover o uso. Contudo, a presença de metais tóxicos em lodos industriais representa um desafio significativo. Assim, objetivou-se avaliar o efeito de diferentes concentrações de lodo de estação de tratamento de água (ETA), de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil, agregado ao solo, sobre o crescimento e desenvolvimento da *Lactuca sativa* L. como bioindicador. A revisão bibliométrica consistiu em mapear publicações científicas e tendências globais no aproveitamento desses resíduos, com foco em suas aplicações e desafios no contexto ambiental e agrícola. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com monitoramento dos dados de temperatura e umidade. Para os tratamentos foram adicionadas diferentes dosagens dos lodos no solo, nas proporções de 1%, 5%, 10%, 25%, 50% e 75%. O solo e os lodos foram caracterizados em função de parâmetros físico-químicos pela análise do pH, condutividade elétrica, série de sólidos e a concentração de metais pesados (Zn, Al, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb e Cr). As plantas foram avaliadas quanto a quantidade, comprimento, peso úmido e seco das folhas, bem como concentração dos metais para o cálculo do Fator de Bioacumulação (FBC). Não houve bioacumulação de Al em nenhum dos tratamentos. As plantas tiveram melhor desenvolvimento com lodo galvânico, evidenciado por melhores médias nos parâmetros analisados, bem como características fenotípicas de cor das folhas e tamanho das plantas. No galvânico, o FBC manteve-se < 1 para a maioria dos metais, exceto para o Pb e Zn em 4 das dosagens. Em contrapartida, para os de ETA e têxtil o FBC manteve-se > 1 para todas as dosagens em Zn e destaque para Mn, Ni e Pb no têxtil. Esse resultado foi refletido no baixo desenvolvimento da alface para ambos. Este estudo comprovou a capacidade de toxicidade de metais pesados no desenvolvimento vegetal e possíveis riscos alimentares pela bioacumulação. Ademais, forneceu subsídios para o desenvolvimento de práticas mais seguras e sustentáveis no manejo desses resíduos no contexto de uso na agricultura para plantas não consumidas *in natura*.

.

Palavras-chave: Contaminantes; Fitotoxicidade; Resíduo industrial.

ABSTRACT

ALMEIDA, Maria Eduarda Borges de, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, January, 2025. **Bioaccumulation study of toxic metals in lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in the presence of industrial sludges.** Adviser: Rosângela Gomes Tavares. Co-adviser: Patrícia Karla Batista de Andrade.

The use of industrial waste in agriculture has been widely studied as a sustainable alternative to minimize environmental impacts resulting from improper disposal and to promote use. However, the presence of toxic metals in industrial sludge represents a significant challenge. The aim was to evaluate the effect of different concentrations of sludge from a water treatment plant (WTP), an electroplating industry and a textile industry, added to the soil, on the growth and development of *Lactuca sativa* L. as a bioindicator. The bibliometric review consisted of mapping scientific publications and global trends in the use of this waste, focusing on its applications and challenges in the environmental and agricultural context. The experiment was conducted in a greenhouse with temperature and humidity data monitored. For the treatments, different dosages of sludge were added to the soil, in the proportions of 1%, 5%, 10%, 25%, 50% and 75%. The soil and sludge were characterized in terms of physical-chemical parameters by analyzing pH, electrical conductivity, solid series and the concentration of heavy metals (Zn, Al, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb and Cr). The plants were evaluated in terms of quantity, length, wet and dry weight of the leaves, as well as the concentration of metals to calculate the Bioaccumulation Factor (BCF). There was no bioaccumulation of Al in any of the treatments. The plants developed better with galvanic sludge, as evidenced by better averages in the parameters analyzed, as well as phenotypic characteristics of leaf color and plant size. In galvanic sludge, the FBC remained < 1 for most metals, except for Pb and Zn in 4 of the dosages. On the other hand, for the WTP and textile plants, the BCF was > 1 for all dosages of Zn, with Mn, Ni and Pb standing out in the textile plant. This result was reflected in the low lettuce growth for both. This study proved the toxicity of heavy metals on plant development and possible food risks due to biacumulation. In addition, it provided subsidies for the development of safer and more sustainable practices in the management of this waste in the context of agricultural use for plants not consumed in natura.

Keywords: Contaminants; Industrial waste; Phytotoxicity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo geral	15
2.1. Objetivos específicos	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
4. CAPÍTULO 1 – FORMAS DE USO DO LODO INDUSTRIAL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	20
4.1. Resumo:	20
4.2. Introdução	20
4.3. Material e Métodos	22
4.4. Resultados e Discussão	23
4.5. Conclusões	29
4.6. Referências.....	30
5. CAPÍTULO 2 – IMPACTO DE DIFERENTES DOSAGENS DE LODOS INDUSTRIAIS NO DESENVOLVIMENTO DA ALFACE	33
5.1. Resumo:	33
Palavras-chaves: Bioacumulação, , Lodo de ETA, Logo galvânico, Lodo têxtil	33
5.2. Introdução	33
5.3. Material e Métodos	35
5.3.1. Local de estudo e de coletas	35
5.3.2. Montagem e execução do experimento	36
5.3.3. Análises laboratoriais e caracterização dos materiais.....	38
5.3.4. Análise de dados	40
5.4. Resultados e Discussão	40
5.4.1. Temperatura e Umidade	40
5.4.2. Caracterização do solo, dos lodos e dos tratamentos.....	41
5.4.3. Parâmetros da alface	47
5.4.4. Bioacumulação dos metais pesados nas folhas.....	52
5.5. Conclusões	56
5.6. Referências.....	57
6. CONCLUSÕES GERAIS	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO GERAL

A aplicação de resíduos industriais tratados, como lodos de Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETA), galvanoplastia e têxteis, na agricultura, tem sido proposta como uma alternativa sustentável de manejo de resíduos e enriquecimento do solo. No entanto, esses materiais frequentemente contêm metais pesados, como cádmio, chumbo e níquel, que podem afetar o desenvolvimento das plantas e causar impactos ambientais e à saúde humana. Dessa forma, compreender os efeitos de diferentes concentrações desses lodos no cultivo de hortaliças, como a alface (*Lactuca sativa*), é essencial para avaliar seu potencial uso seguro.

No Brasil, o uso agrícola de resíduos sólidos é regulamentado por normas específicas, como a Resolução CONAMA nº 375/2006, revogada pela CONAMA nº 498/2020 que estabelece critérios para a utilização de lodos de esgoto em solos agrícolas. Essas diretrizes buscam mitigar riscos associados à bioacumulação de metais pesados e à contaminação do solo e da água, promovendo o uso sustentável. Nesse contexto, para alimentos consumidos crus não se pode aplicar lodos classe A um mês antes da colheita e para os de classe B é proibido. Para fins de pesquisa não há restrições. Entretanto, a legislação carece de regulamentações específicas para outros tipos de lodo, como os de origem industrial, criando lacunas para práticas agrícolas seguras.

Estudos recentes destacam a importância de avaliar as concentrações de metais pesados em substratos agrícolas e seu impacto no crescimento vegetal, especialmente em cultivos de consumo direto. A alface, por ser sensível a variações no solo e amplamente consumida, torna-se uma espécie modelo para estudos de toxicidade e eficiência de fertilização alternativa. Nesse contexto, a análise comparativa dos efeitos de lodos industriais, considerando parâmetros como pH, condutividade elétrica e bioacumulação de metais, fornece insights para a gestão desses resíduos e a formulação de políticas públicas mais abrangentes (Rocha *et al.*, 2025).

Os lodos de ETA podem contribuir para a melhoria da estrutura do solo. Contudo, a presença de substâncias potencialmente tóxicas nesses resíduos reforça a necessidade de um controle rigoroso sobre sua aplicação. Lodos provenientes da galvanoplastia e da indústria têxtil, por sua vez, tendem a apresentar maiores concentrações de metais pesados, exigindo atenção redobrada na análise de seu impacto em solos agrícolas e no ambiente como um todo (Morselli *et al.*, 2022).

A interação entre metais pesados presentes no lodo e o solo é complexa e depende de fatores como pH, capacidade de troca catiônica e tipo de solo. Em solos com pH mais baixo,

por exemplo, a disponibilidade de metais pesados para absorção pelas plantas aumenta, elevando os riscos de bioacumulação (Costa *et al.*, 2020). Assim, a caracterização química e física do solo e do lodo torna-se uma etapa crucial para a definição de práticas seguras.

Ademais, o uso de lodos como insumos agrícolas deve ser analisado sob a ótica da economia circular, promovendo a reutilização de resíduos industriais, desde que de forma ambientalmente segura. Essa perspectiva alinha-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à segurança alimentar, gestão sustentável de recursos naturais e proteção ambiental.

Com este trabalho busca-se preencher algumas lacunas na compreensão dos impactos do uso de lodos industriais na agricultura, por meio do cultivo de alface como bioindicador. A integração de resultados experimentais sobre o desenvolvimento das plantas, níveis de bioacumulação de metais e características químicas do solo oferecerá informações importantes para orientar a aplicação prática. Ao abordar uma problemática global com implicações locais, a pesquisa também contribuirá para debates sobre sustentabilidade e segurança alimentar.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito de diferentes concentrações de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil, agregado ao solo, sobre o crescimento e desenvolvimento da *Lactuca sativa* L. (alface) como bioindicador

2.1. Objetivos específicos

Caracterizar os lodos de ETA, de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil, quanto a concentração de metais;

Analisar as alterações químicas no solo provocadas pela adição de lodo de ETA, de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil;

Avaliar o desenvolvimento da alface quando exposta à diferentes concentrações de lodo de ETA, de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil, quanto aos parâmetros de comprimento de folhas e raízes, número de folhas e massa verde e seca da parte aérea e da raiz;

Determinar a absorção de metais pesados presentes no lodo de ETA, de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil pela alface, quanto ao Fator de Bioconcentração (FBC) e o Fator de Translocação (FT);

Identificar a dose de lodo de ETA, de indústria de galvanoplastia e de indústria têxtil com menor e maior poder potencial de toxidez para a cultura da alface para fim de seu uso agrícola.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

As estações de tratamento de água (ETA) proporcionam água potável à população, porém em seu processo gera um efluente oriundo da limpeza e lavagem de decantadores e filtros. A composição deste varia de acordo com o tipo de manancial para captação, fatores climáticos, ocupação do solo, coagulante usado no tratamento da água e bacia hidrográfica. Sendo extremamente perigoso se disposto em corpos hídricos pela sua toxidez. Encontrar alternativas para o descarte do resíduo gerado tem sido um desafio, pois a maior parte é lançada em cursos d'água, sem cumprir a legislação vigente (Menezes *et al.*, 2021;).

Na maioria das ETA, o tratamento é feito pela adição de produtos químicos, seguido por etapas de coagulação, floculação, precipitação e filtração. Anualmente, uma ETA chega a produzir cerca de 100.000 toneladas de lodo. Ao caracterizá-lo, os principais compostos químicos presentes são os óxidos de alumínio (Al), silício (Si) e ferro (Fe), além de apresentar alta umidade e matéria orgânica. É válido destacar que, no Brasil, o sulfato de alumínio é o coagulante mais utilizado no tratamento da água, assim o lodo de ETA possui um alto teor de alumínio. Esse lodo, de acordo com a Política Brasileira de Resíduos Sólidos, deve ter uma destinação final ambientalmente responsável (Menezes *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022).

Quando o lodo de ETA é descartado em corpos hídricos, não apenas afeta a qualidade da água, como também do solo pelo acúmulo de metais, nutrientes, bactérias e material orgânico. Contudo, quando bem manejado, esse lodo possui capacidade de adsorção de ânions que possibilita seu uso para a remediação de áreas contaminadas a depender das substâncias húmicas presentes. A sua aplicação pode ser feita na forma líquida, semissólida ou sólida no solo natural. Pode ser aplicado sem a redução de Al, caso a cultura agrícola seja tolerante (Morselli *et al.*, 2022).

3.2 INDÚSTRIA DA GALVANOPLASTIA

A galvanoplastia consiste numa técnica baseada em banhos químicos ou eletrolíticos de peças para evitar a erosão e aumentar a sua resistência. Essas peças, normalmente produzidas em aço, ferro e alumínio, precisam estarem quimicamente limpas. Assim, são submetidas a banhos alcalinos, desengraxantes e lavagens com água. Primeiro ocorre um pré-tratamento para remoção das gorduras, graxas, óxidos, ferrugem e qualquer outro componente que impeça a superfície da peça estar lisa. Segue-se para o tratamento, onde há o processo de deposição metálica das peças e por fim o pós-tratamento para o acabamento das peças (Rocha *et al.*, 2017).

Ao final são produzidos efluentes líquidos com diferentes características. O tratamento desse tipo de efluente é feito, principalmente, por osmose e por eletrodialise (CARRARA, 1997).

De acordo com a Companhia Pernambucana do Meio Ambiente (CPRH, 2001), os efluentes galvânicos podem ser classificados como efluentes crômicos; cianídricos; gerais ácidos; gerais alcalinos; quelatizados e óleos. Este efluente é encaminhado para um sistema de tratamento no qual os metais pesados formam um precipitado, chamado de lodo galvânico, removido por decantação ou filtração. Esse lodo é considerado um resíduo perigoso, pois sua deposição inadequada pode resultar na liberação de metais acima dos níveis aceitáveis.

3.3 INDÚSTRIA TÊXTIL

Nas indústrias têxteis é produzido um efluente de difícil degradabilidade que quando disposto de forma irregular no ambiente, sua toxicidade pode degradar os ecossistemas. Esse resíduo possui uma composição complexa e variada e em geral apresenta elevada carga orgânica, corantes sintéticos, solventes e surfactantes e metais pesados. Nos processos além do efluente também há a formação do lodo como um subproduto poluidor (Moura *et al.*, 2021).

No tratamento, o efluente passa por etapas em que são removidos resíduos mais grosseiros e é homogeneizada a mistura, seguindo-se então à aplicação de agentes coagulantes, sendo os mais empregado o policloreto de alumínio e o sulfato de alumínio, na etapa de coagulação, floculação e decantação, por fim é originado o lodo têxtil, que é removido do decantador e descartado, muitas vezes de forma inadequada (Moura *et al.*, 2021)

Os principais metais poluentes presentes são: cromo, zinco, ferro, mercúrio e chumbo. Em geral, a composição varia bastante, pois depende das características das fibras e dos produtos químicos usados nos processos. Os principais adicionados são corantes, dos quais cerca de 50% são perdidos e permanecem no efluente ou lodo. (Souza *et al.*, 2016; Yassen, 2019).

3.4 Uso de lodo na agricultura

A crescente industrialização está diretamente relacionada com o aumento na produção de lodo (Rasheed *et al.*, 2020). O descarte desses resíduos em mananciais de água é uma prática não mais aceita pela sociedade. Outra opção é a disposição em aterros sanitários, mas nesse cenário fica em evidência os riscos para a poluição do solo. Assim, há uma urgência para a atualização de normas específicas que regulem a disposição final.

Os lodos industriais, de acordo com a legislação brasileira, são classificados conforme suas características químicas, físicas e biológicas, seguindo a NBR 10.004/2004 e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). O lodo de ETA é classificado como resíduo sólido classe II-A (não perigoso e não inerte), sendo constituído por argila, areia, matéria orgânica e óxidos metálicos, com potencial de reaproveitamento em atividades como recuperação de áreas degradadas ou produção de materiais de construção.

O lodo têxtil pode ser enquadrado como classe I (perigoso) ou classe II-A, dependendo de sua composição química, uma vez que frequentemente contém metais pesados e compostos orgânicos complexos, necessitando de tratamento prévio para seu uso. Por outro lado, o galvanizado é categorizado como resíduo sólido classe I (perigoso) devido às elevadas concentrações de metais tóxicos, como cádmio, níquel, cromo e zinco, sendo indicado para destinação em aterros industriais classe I ou tratamentos específicos, como estabilização química ou recuperação de metais.

No contexto ambiental, a possibilidade do uso desses resíduos na agricultura aparece como uma alternativa mais sustentável. Nesse sentido, os lodos podem fornecer para as plantas nutrientes essenciais e trazer benefícios também para o solo (Teixeira; Melo; Silva, 2007). Contudo, deve-se ter atenção com a composição dos lodos em relação a presença de metais pesados e assim minimizar os riscos de contaminação. Para tanto, no Brasil, a Resolução CONAMA Nº 498, de 19 de agosto de 2020, revoga a CONAMA Nº 375/2006 e define critérios para o uso de biossólidos no solo sobre a concentração máxima de metais pesados (tabela 1).

Tabela 1. Concentração máxima permitida de substâncias químicas nos lodos com destinação agrícola.

Substâncias químicas	Concentração máxima permitida (mg.kg ⁻¹)
Arsênio	41
Bário	1.300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1.500
Crômio	1.000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	36
Zinco	2.800

Adaptado da Resolução CONAMA Nº 498/2020

O lodo galvânico, por ser classificado como Classe I, não é diretamente regulamentado para uso agrícola. Por isso, antes de sua aplicação, o lodo deve passar por tratamentos que reduzam a mobilidade dos metais (ex.: estabilização, imobilização) e deve ser realizado um estudo de risco ambiental considerando a lixiviação e a bioacessibilidade dos metais no solo (Rocha *et al*, 2017). Esse procedimento vale também para o têxtil.

3.5 BIOACUMULAÇÃO VEGETAL

A alface é uma hortaliça de ciclo anual, pertencente à família Asteraceae, da subfamília Cichorioideae, do gênero *Lactuca*. Em sua composição química possui 95% de água, sendo consumida *in natura* em saladas. Este vegetal é recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos como uma das espécies indicadas para testes de avaliação da toxicidade de produtos químicos (USEPA, 1996). Santos *et al.* (2021), ao analisar a aplicação de lodo de ETA no cultivo da alface concluiu ser uma alternativa econômica e ambientalmente viável, contribuindo para a redução na aquisição de fertilizantes e promovendo uma agricultura sustentável. Ressaltou também a necessidade de repetir testes em diferentes tipos de solo.

Alguns estudos foram realizados para analisar a germinação e desenvolvimento de diferentes espécies vegetais em contato com lodo. Nesses estudos as concentrações testadas variaram de 0 à 100%, e como resultado em comum observou-se que quanto mais próximo de 100% menores foram as taxas de germinação. Por exemplo, Liebl e Schoen (2022) ao testarem a germinação de alface e cebola em lixiviados com 0,5%, 1%, 5%, 10%, 50% e 100% de lodo, constataram que nas concentrações maiores o Crescimento Relativo da Radícula e o Índice de Germinação foram relativamente menores. Já com relação ao desenvolvimento vegetal um dos fatores discutido versou sobre o lodo ter a tendência a ficar seco e endurecido, de maneira a dificultar a passagem da água e translocação de nutrientes. Além da influência da concentração de metais pesados (Cunha; Stachiw; Quadros, 2020; Bitencourt *et al.*, 2020).

Em estudo para a avaliação da toxicidade de lodos de ETA e de estação de tratamento de esgoto (ETE) sobre a germinação de sementes de alface e cebola, Liebl e Schoen (2022) constataram que o lodo de ETA potencializou a germinação e o crescimento radicular da alface. O aumento das concentrações de lodo respondeu como aumento da toxicidade nos vegetais. Ainda assim, nesses casos foi preferível o uso de lodo de ETA. Cabe ressaltar a utilização desses vegetais como bioindicadores de toxicidade.

4. CAPÍTULO 1 – FORMAS DE USO DO LODO INDUSTRIAL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

4.1. Resumo:

O uso do lodo industrial é um tema de crescente interesse na comunidade científica, principalmente em virtude das pressões ambientais e econômicas que demandam práticas sustentáveis e eficientes de gestão de resíduos. A bibliometria tem proporcionado compreensões valiosas sobre padrões de publicação, redes de colaboração, assim como tendências emergentes em áreas específicas do conhecimento. Assim, por meio deste estudo objetivou-se realizar uma análise bibliométrica das formas de uso do lodo industrial, com foco nas tendências de pesquisa e áreas de aplicação, identificar lacunas no conhecimento e explorar oportunidades para futuras investigações sobre a temática. Utilizando-se a base de dados da Scopus, foram selecionados 193 artigos publicados durante o período de 2013 até 2023. A quantidade de publicações anuais para esta temática demonstrou uma tendência de crescimento, principalmente a partir do ano de 2019. Por fim, o resultado da análise bibliométrica destacou a crescente colaboração internacional em estudos sobre a importância do uso do lodo como uma alternativa sustentável, contribuindo para a economia circular. As principais áreas de aplicação incluem a agricultura e a construção civil.

Palavras-chaves:

Economia circular; desenvolvimento sustentável; resíduos industriais

4.2. Introdução

A bibliometria, um campo de estudo que aplica métodos estatísticos e matemáticos para analisar a literatura científica, tem se tornado uma ferramenta essencial para compreender a evolução do conhecimento em diversas áreas de estudo. Essa ferramenta tem proporcionado compreensões valiosas sobre padrões de publicação, redes de colaboração, impacto de pesquisadores e instituições, assim como tendências emergentes em áreas específicas do conhecimento (Donthu *et al.*, 2021).

Historicamente, a bibliometria ganhou destaque com os trabalhos pioneiros de Eugene Garfield e a criação do Institute for Scientific Information (ISI) na década de 1960 (Garfield, 2006). O desenvolvimento de índices de citação, como o Journal Impact Factor (JIF), inovou a avaliação da produção científica, possibilitando métricas quantitativas para medir o impacto e a qualidade das publicações (Wouters; Rushforth, 2018). Esses índices também geraram debates sobre suas limitações e possíveis distorções no comportamento dos pesquisadores (Bornmann; Haunschild, 2018).

O avanço das tecnologias digitais e o acesso a grandes volumes de dados transformaram a bibliometria, permitindo análises mais sofisticadas e abrangentes (Ortiz-Remede *et al.*, 2019). Ferramentas como o Web of Science, Scopus e Google Scholar ampliaram as possibilidades de análise, oferecendo uma visão mais holística e dinâmica da produção científica (Haunschild; Bornmann; Leydesdorff, 2020). Este progresso tecnológico permitiu a identificação de padrões ocultos, relacionamentos complexos entre tópicos de pesquisa e a evolução temporal de áreas do conhecimento.

Um dos principais desafios na bibliometria é a integração e a harmonização de diferentes bases de dados, que frequentemente apresentam inconsistências e variações nos dados bibliográficos (Gavel; Isilid, 2018). Ademais, a diversificação das formas de comunicação científica, incluindo preprints, repositórios de dados abertos e mídias sociais, requer novas abordagens metodológicas para capturar e analisar a totalidade da produção científica (Priem, 2020).

Por fim, a bibliometria desempenha uma função importante na formulação de políticas científicas e na gestão de instituições de pesquisa. As métricas bibliométricas são frequentemente utilizadas para a avaliação de desempenho, alocação de recursos e definição de estratégias de desenvolvimento científico e tecnológico (Hicks *et al.*, 2015). Contudo, é fundamental que essas métricas sejam aplicadas de maneira crítica e contextualizada, a fim de evitar uma dependência excessiva de indicadores quantitativos em detrimento de avaliações qualitativas e contextuais (Bornmann, 2017).

Com base em estudos nesse sentido, é sabido que o uso do lodo industrial tem sido um tema de crescente interesse na comunidade científica, principalmente em virtude das pressões ambientais e econômicas que demandam práticas sustentáveis e eficientes de gestão de resíduos. O lodo, subproduto gerado em diversos processos industriais, possui um potencial significativo de reaproveitamento, mitigando os impactos ambientais e contribuindo para a economia circular (Munawar, 2021).

No setor têxtil, a geração de lodo ocorre principalmente durante o processo de tratamento de efluentes, onde diversos produtos químicos são utilizados. A composição complexa desse lodo, contendo metais pesados e compostos orgânicos, torna seu manejo um desafio. No entanto, estudos recentes indicam que o lodo têxtil pode ser tratado e reutilizado como matéria-prima na fabricação de materiais de construção, como tijolos e cimento, reduzindo a necessidade de descarte em aterros sanitários (Balasubramanion *et al.*, 2006).

Da mesma forma, a indústria galvânica, responsável pela eletrodeposição de metais, produz lodo com altas concentrações de metais pesados, como cromo e zinco. A recuperação

desses metais do lodo galvânico não só é viável, como também economicamente vantajosa, permitindo sua reintrodução no processo produtivo ou em outras aplicações industriais (Pandey *et al.*, 2022). Esse uso contribui para a minimização de resíduos perigosos e para a conservação de recursos naturais.

Ademais, o lodo proveniente das estações de tratamento de água (ETA) é gerado em grande quantidade e é rico em materiais inorgânicos e orgânicos. Recentemente, pesquisas têm explorado o uso desse lodo na agricultura como condicionador de solo e em processos de compostagem, destacando benefícios como a melhoria da qualidade do solo e o incremento na produtividade agrícola (Yalçintas *et al.*, 2023).

O presente artigo de revisão bibliométrica visa compilar e analisar as principais tendências na pesquisa sobre o uso do lodo industrial. A análise bibliométrica permitirá identificar as principais áreas de estudo, lacunas no conhecimento e oportunidades para futuras pesquisas. Isso contribuirá para a consolidação de práticas sustentáveis na gestão de resíduos industriais e oferecer uma visão abrangente e crítica deste campo em constante evolução.

4.3. Material e Métodos

A metodologia para a condução de uma revisão bibliométrica deve ser sistemática e detalhada, conforme recomendado pela literatura especializada (Mingers; Leydesdorff, 2015). A presente revisão bibliométrica sobre o uso do lodo industrial seguiu uma série de etapas metodológicas claramente definidas, que garantiram a rigorosidade e a validade dos resultados.

Inicialmente, definiu-se o escopo e os objetivos do estudo. O foco da revisão foi analisar as principais tendências de pesquisa, identificar lacunas no conhecimento e explorar oportunidades para futuras investigações sobre o uso do lodo industrial. Este passo foi fundamental para direcionar a busca e seleção dos artigos relevantes (Kumar, 2019). A seleção das bases de dados científicas foi uma etapa crucial. Para garantir a abrangência e a relevância dos artigos analisados, foi escolhida apenas a base de dados Scopus. Essa base de dados é amplamente reconhecida por sua extensa cobertura e qualidade das publicações indexadas, conforme destaca Mingers e Leydesdorff (2015).

Foram definidos critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos artigos. Os critérios de inclusão foram: artigos publicados nos últimos 10 anos (2013-2023), publicações em revistas científicas revisadas por pares, e estudos focados no uso do lodo industrial. Os critérios de exclusão incluíram publicações em línguas diferentes do inglês e artigos que não apresentaram dados bibliométricos compatíveis para a análise (VOSviewer, 2020).

A busca sistemática da literatura foi realizada na base de dados selecionada, utilizando palavras-chave e termos relacionados ao tema em inglês, sendo elas: “sludge management”, “sludge reuse”, “sludge application”, “sludge disposal”, “sludge circular economy” e “toxicity”. Utilizou-se o operador booleano “OR” para refinar a busca e garantir a recuperação de artigos relevantes, resultando em 10.670 achados. Na sequência foram especificadas a área de estudo - “Agricultural and Biological Sciences”; o tipo de documento - “Articles”; a fase de publicação final, resultando em 193 artigos.

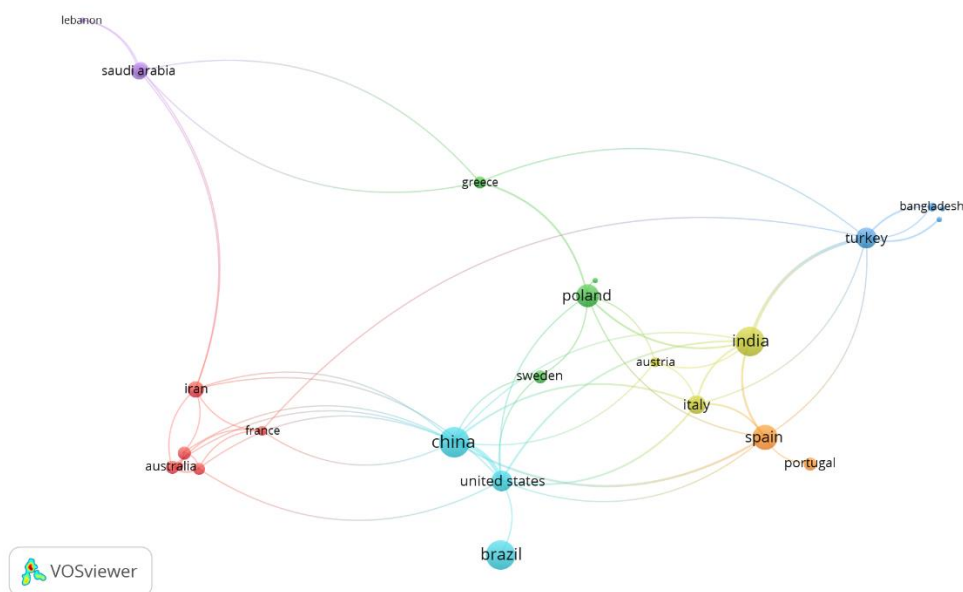
Os resumos dos artigos recuperados foram lidos e avaliados com base nos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Dados relevantes foram extraídos de cada artigo, incluindo informações sobre os autores, ano de publicação, título, palavras-chave, resumo, número de citações e métricas bibliométricas específicas (Bornmann; Daniel, 2008).

A análise bibliométrica foi conduzida utilizando a ferramenta de software VOSviewer e o Excel. As análises incluíram análise de citações, as principais redes de coautoria e colaboração entre países, palavras-chave e tópicos mais frequentes. Os resultados da análise bibliométrica foram interpretados e discutidos à luz dos objetivos do estudo. Identificaram-se as principais tendências de pesquisa, áreas de maior impacto e lacunas no conhecimento, bem como sugestões para futuras pesquisas.

4.4. Resultados e Discussão

Sobre o tema do uso do lodo industrial, foi possível observar padrões interessantes de cooperação científica internacional. Países como China, Estados Unidos, Índia e Brasil estão no centro das redes de citação, sugerindo que esses países são líderes na pesquisa e inovação em temas relacionados ao tratamento e uso de resíduos industriais. A partir do mapa de citações entre países, é possível observar as relações entre diversos países, destacando quais deles se conectam mais fortemente em suas colaborações e trocas de conhecimento (Figura 1).

Figura 1. Mapa de citações por países.



Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a China, em particular, vem se destacando em pesquisas que envolvem a gestão de resíduos industriais, sendo um dos maiores produtores de lodo industrial e também uma referência no desenvolvimento de tecnologias para seu tratamento e reaproveitamento. Estudos mostram que a China tem investido em processos como biochar, que converte resíduos orgânicos em produtos de valor agregado, como materiais de construção (Xiao *et al.*, 2021).

Além disso, os Estados Unidos também aparecem como um importante protagonista no desenvolvimento de soluções inovadoras para o uso do lodo. A colaboração entre China e Estados Unidos é relevante no campo da pesquisa ambiental, dado o interesse comum em desenvolver novas tecnologias que possam mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos (Chadha *et al.*, 2023).

O Brasil, por sua vez, tem focado em pesquisas que buscam o uso do lodo industrial no contexto da economia circular, com aplicações como fertilizantes e na construção civil. O desenvolvimento de parcerias internacionais, como mostrado no mapa, tem sido essencial para a transferência de tecnologias e o compartilhamento de boas práticas, especialmente em relação à eficiência energética no processamento de resíduos (Souza *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2023; Amorim Júnior *et al.*, 2022).

A Índia também desempenha um papel importante no desenvolvimento de estratégias para a reutilização de lodo industrial, principalmente em setores como o tratamento de água e a agricultura. Assim, tem implementado diversas tecnologias que reaproveitam o lodo em áreas rurais e urbanas, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais (Balkrishna *et al.*, 2024). As colaborações entre Índia, China e outros países da Ásia reforçam a importância de

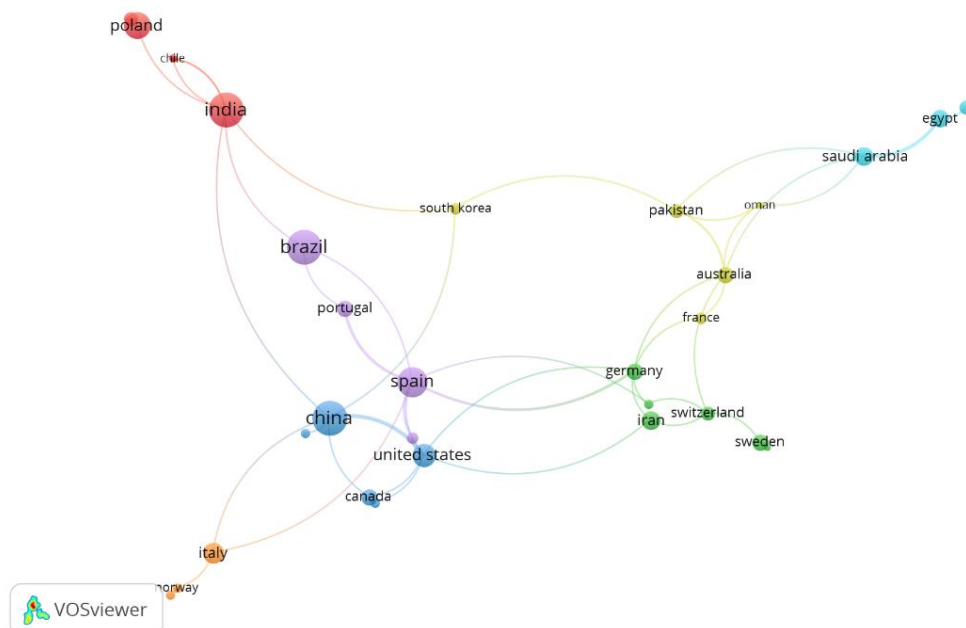
redes regionais para o avanço das tecnologias ambientais, especialmente em países que enfrentam desafios semelhantes em relação à gestão de resíduos (Srivastava *et al.*, 2023).

Outro ponto de destaque é o papel da União Europeia na promoção de colaborações científicas, refletido pela conexão de países como Itália, Espanha, Polônia e Suécia. A Itália, por exemplo, mantém fortes vínculos de citação com países do sul da Europa, como Espanha e Portugal, o que pode indicar uma preferência por colaborações dentro da própria região. A pesquisa europeia tende a ser fortemente colaborativa. O Horizon Europe e outros programas de financiamento têm promovido essas colaborações, fomentando o compartilhamento de boas práticas em tratamento de resíduos (EU Commission, 2023).

Por outro lado, nota-se que países como Irã e Arábia Saudita também estão construindo redes de colaboração significativas, especialmente com países vizinhos e em desenvolvimento, como o Líbano. O Irã aparece como um dos países com maior conectividade, evidenciando a busca ativa por colaborações internacionais, com destaque para Austrália e França. Isso pode refletir uma estratégia de diversificação de parcerias, buscando tanto parceiros do Ocidente quanto de países em desenvolvimento (Academy of Science, 2023).

O mapa de coautoria entre países revela uma rede complexa de colaborações internacionais em produções científicas. Cada bolha no gráfico representa um país, e as linhas entre as bolhas indicam a força das conexões, ou seja, a frequência com que esses países colaboram em publicações acadêmicas (Figura 2).

Figura 2. Mapa de coautoria por países.



Fonte: Autora (2015).

Os clusters formados no mapa sugerem agrupamentos regionais ou temáticos de colaboração. Um exemplo é o cluster vermelho, que inclui Índia, Polônia e Chile, indicando uma cooperação intensa entre essas nações em áreas específicas da ciência. Já o cluster verde, com Irã, Alemanha e Suíça, reflete conexões fortes entre países europeus e do Oriente Médio, sugerindo colaborações em áreas de interesse comum. Por outro lado, o cluster azul, que agrupa China, Estados Unidos e Canadá, destaca a interação entre grandes potências científicas, de maneira a evidenciar colaborações em projetos de maior escala, frequentemente relacionados a avanços tecnológicos e inovação, como já sugerido.

Os padrões de colaboração revelados no mapa também apontam para a diversidade de conexões internacionais. A Índia, por exemplo, mantém colaborações com países de diferentes continentes, como Chile, Brasil, Polônia, China e Estados Unidos. Essa diversificação pode refletir uma estratégia eficaz para ampliar o impacto global de suas pesquisas. Em contrapartida, países como Egito e Noruega aparecem mais isolados na rede, com menos conexões, sugerindo uma menor participação em colaborações científicas amplamente distribuídas.

A força das ligações entre os países, representada pela espessura das linhas, também oferece insights relevantes. Por exemplo, a ligação forte entre Índia e Polônia reflete uma colaboração frequente entre pesquisadores desses países. Da mesma forma, as colaborações entre Estados Unidos e China são notáveis, reforçando o papel dessas nações como potências científicas de destaque, cujas parcerias têm um impacto significativo no meio acadêmico.

Dentre os artigos analisados foi possível observar diferentes enfoques de pesquisa. Na Índia, Verma *et al.* (2021) investigaram o impacto da aplicação combinada de lodo de esgoto e fertilizantes químicos em um sistema de cultivo de milho-trigo. Os resultados indicaram que houve aumentos significativos no carbono orgânico do solo, na capacidade de troca catiônica e nos teores de nitrogênio e fósforo disponíveis no solo devido à aplicação de lodo de esgoto. Além disso, essa combinação proporcionou os maiores retornos brutos, retornos líquidos e relação benefício-custo. No Brasil, houve a pesquisa de Souza *et al.* (2020) que investigou os impactos do uso agrícola de lodo de esgoto em organismos bioindicadores terrestres e aquáticos. As análises revelaram alterações histopatológicas significativas nos organismos expostos, indicando que a aplicação pode causar danos celulares e teciduais nesses bioindicadores.

Como já explicitado, a China foi o país de maior destaque tanto em quantidade de trabalhos quanto em colaborações. Nesse contexto, trabalhos como o de Li *et al.* (2021) investigou os efeitos da aplicação de lodo de esgoto nas características físico-químicas do solo

e na comunidade bacteriana de planícies costeiras. Zhao *et al.* (2021) identificaram que o tipo de vegetação arbórea pode influenciar a resposta microbiana à aplicação de lodo de esgoto. Em outro estudo, Zhang *et al.* (2022) analisaram como diferentes temperaturas de pirólise (300 °C, 500 °C e 700 °C) afetam as propriedades do biochar derivado de lodo de esgoto. A análise indicou que biochars produzidos em temperaturas mais altas apresentaram menor risco ambiental devido à menor lixiviação de metais pesados. Esses foram alguns exemplos da diversidade de estudos encontrados.

A colaboração científica internacional tem se mostrado essencial para aumentar a produtividade e a qualidade da pesquisa. Além disso, as colaborações internacionais não apenas promovem avanços científicos, mas também trazem benefícios econômicos e sociais. O governo australiano, por exemplo, reconhece que a abertura e o intercâmbio científico são altamente positivos para o crescimento econômico e a sustentabilidade, destacando a importância de construir parcerias regionais e globais (Unesco, 2023)

Para compreender o panorama das publicações analisadas, foram observadas as revistas científicas que se destacaram dentre os artigos selecionados. Assim, foram listadas as dez mais relevantes em número de artigos publicados, considerando aspectos como, classificação Qualis CAPES, Fator de Impacto, área de concentração e o país de origem (Quadro 1).

Quadro 1. Revistas científicas com mais publicações no período de 2013 à 2023.

Revista	Quantidade de artigos	Qualis CAPES	Fator de Impacto (JCR)	Área de concentração	País
International Journal of Environmental Science and Technology	9	A2	3.69	Ciências Ambientais, Engenharia Ambiental	Irã
Applied Soil Ecology	8	A1	3.89	Ecologia do Solo, Ciências Ambientais	Países Baixos (Holanda)
Water (Switzerland)	8	A2	2.544	Recursos Hídricos	Suíça
Journal of Soil Science and Plant Nutrition	7	A2	1.560	Nutrição de Plantas e Solo	Chile
Environmental Technology and Innovation	7	A1	4.500	Inovação e Tecnologia Ambiental	Países Baixos (Holanda)
Journal of Ecological Engineering	5	A2	2.1	Engenharia Ecológica	Polônia
Communications in Soil Science and Plant Analysis	5	A2	1.5	Ciências do Solo	Estados Unidos
International Journal of Phytoremediation	5	A1	4.180	Fitorremediação	Estados Unidos
Agronomy	4	A1	3.949	Agronomia	Suíça
Land Degradation and Development	4	A1	7.27	Degradação e Recuperação de Solos	Países Baixos (Holanda)

.Fonte: Autora (2025).

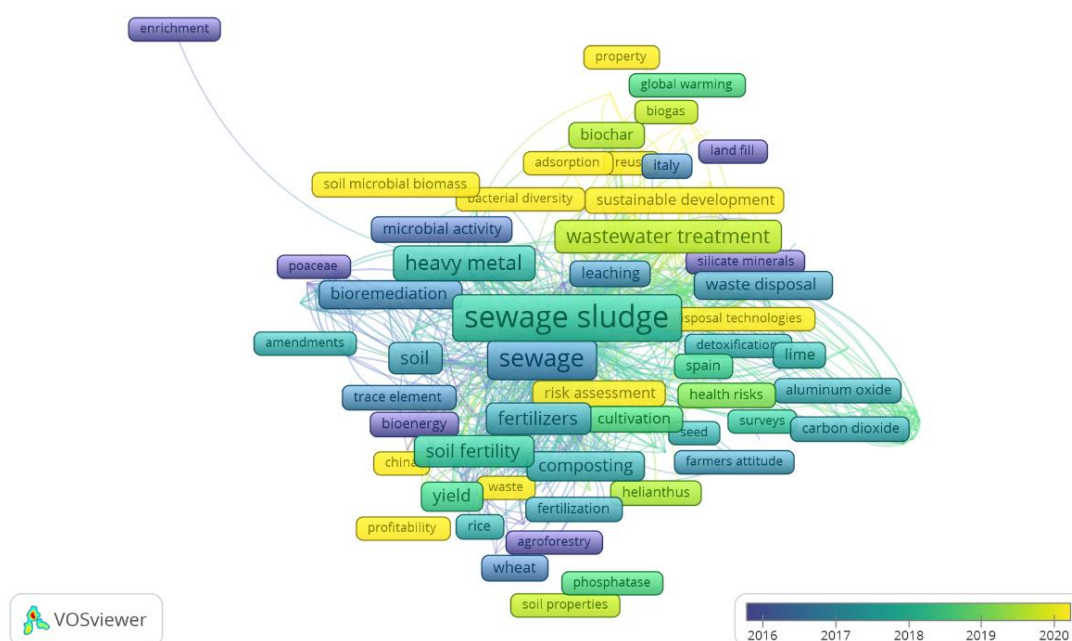
A análise das revistas destacadas na tabela revela uma forte presença de periódicos voltados para o estudo da sustentabilidade e da inovação ambiental, aspectos diretamente relacionados à temática do uso de lodo industrial. Revistas como *Environmental Technology and Innovation* e *Ecological Engineering* apresentam um foco em tecnologias emergentes e soluções ecológicas, áreas fundamentais para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis no gerenciamento de resíduos industriais. O uso do lodo é frequentemente abordado em periódicos de alto impacto que discutem inovação ambiental, reforçando a importância dessas publicações para a disseminação de soluções inovadoras nessa área. Segundo Araujo *et al.* (2022) o uso sustentável de lodo industrial pode promover melhorias no solo e reduzir o impacto ambiental gerado pelo descarte inadequado.

As três revistas que lideram a lista, *International Journal of Environmental Science and Technology*, *Applied Soil Ecology* e *Water*, possuem fatores de impacto significativos (3.0, 4.8 e 3.0, respectivamente), o que reflete a visibilidade de suas publicações na comunidade científica. O maior valor para o Fator de Impacto foi observado na revista *Environmental Technology and Innovation* (6.7). Esses dados sugerem que os artigos publicados nessas revistas são frequentemente citados, indicando sua relevância nas áreas de ciências ambientais e ecologia. Além disso, as revistas possuem classificações Qualis elevadas (A1 e A2), com menores sendo A3 e B1. Esse desempenho no sistema Qualis CAPES demonstra que elas são altamente prestigiadas tanto no Brasil quanto no cenário internacional.

Em termos de origem, as revistas são de diferentes países, com localização nos mais diversos continentes do globo. Isso reflete a internacionalização da ciência ambiental, com contribuições importantes tanto de países desenvolvidos quanto de países em desenvolvimento. Em termos gerais, com relação a distribuição dos anos de publicação, o período de 2013 a 2023 mostrou uma distribuição constante de publicações. O ano de 2021 lidera com 25 artigos. Anos como 2020 e 2023 também tiveram uma produção relevante com 20 e 17 artigos, respectivamente. Entre 2015 e 2019, houve uma produção estável de cerca de 15 a 20 artigos por ano.

A análise das palavras-chave mais utilizadas levou em consideração a ocorrência mínima de 2. Dessa forma, à luz desse parâmetro foi possível fazer observações numa linha do tempo de publicações entre 2016 e 2020 com relação às tendências de pesquisa (Figura 3).

Figura 3. Mapa de palavras-chave mais usadas entre o período de 2016 à 2020.



Fonte: Autora (2025).

O termo "sewage sludge" aparece como a principal palavra-chave, com 79 ocorrências. A forte conexão com "soil" destaca a ênfase na utilização do lodo como fertilizante do solo. Além disso, a presença notável de "heavy metal" ressalta a preocupação acerca da contaminação do solo por substâncias tóxicas presentes no lodo.

Entre 2016 e 2017, observa-se que as pesquisas se concentram em temas como "biomassa microbiana do solo", "biodiversidade bacteriana", "atividade microbiana" e "biorremediação". Esse foco inicial sugere um interesse em compreender o impacto do lodo nos microrganismos do solo e seu potencial para promover a biorremediação. A partir de 2018, há um crescimento nas pesquisas sobre o tratamento de águas residuais e fertilizantes. Neste período, as preocupações com metais pesados também se intensificaram, indicando uma maior atenção às questões de segurança e contaminação.

Entre 2019 e 2020, as pesquisas se diversificaram, abrangendo temas como cultivo, compostagem, fertilidade do solo e propriedades do solo. Essa expansão temática reflete um interesse na aplicação prática do lodo tratado na agricultura, com foco na avaliação de seu impacto na produção agrícola e nas características do solo. Além disso, apareceram tópicos como aquecimento global, biogás e desenvolvimento sustentável, evidenciando a busca por soluções sustentáveis para o gerenciamento de resíduos e mitigação das mudanças climáticas.

4.5. Conclusões

Este estudo bibliométrico destacou as principais tendências e lacunas na pesquisa sobre o uso do lodo industrial. Embora as preocupações com a contaminação do solo, especialmente por metais pesados, continuem a ser um tema relevante, as pesquisas têm se voltando para os benefícios e riscos da aplicação do lodo, enfatizando a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental. O uso aparece como uma alternativa sustentável, contribuindo para a economia circular. As principais áreas de aplicação incluem a agricultura e a construção civil.

Os dados bibliométricos ressaltaram a importância da colaboração internacional e indicaram uma tendência crescente de pesquisas focadas no uso sustentável do lodo industrial. Para estudos futuros, seria interessante explorar a viabilidade econômica e regulamentação para promover o uso do lodo industrial.

4.6. Referências

- AMORIM JÚNIOR, S. S.; PEREIRA, M. A. S.; MORISHIGUE, M.; COSTA, R. B. GUILHERME, D. O.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Circular economy in the biosolids management by Nexus approach: a view to enhancing safe nutriente recycling – pathogens, metals, and emerging organic pollutants concern. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 22, p. 14693, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su142214693>.
- ARAÚJO, V. dos S.; SILVA, M. O.; BRITO, A. S. de.; SOUSA, I. de L.; NUNES, F. C. *et al.* Sewage sludge and its agricultural potential. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. e14711326200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26200>
- AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE. **International scientific collaborations in a contested world**: Discussion paper. Disponível em: < <https://www.science.org.au/supporting-science/science-policy-and-analysis/reports-and-publications/international-scientific-collaborations-in-a-contested-world-discussion-paper>>. Acesso em: 06 set. 2024.
- BALASUBRAMANION, J.; SABUMON, P. C.; LAZAR, J. U.; ILANGO VAN, R. Reuse of textile effluent treatment plant sludge in Building materials. **Waste management**, v. 26, n. 1, p. 22 – 28, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.011>.
- BALKRISHNA, A.; BANERJEE, S.; GHOSH, S.; CHAUHAN, D.; KAUSHIK, I.; ARYA, V. Reuse of sewage sludge as organic agricultural products: na eficiente technology-based initiative. **Applied and environmental soil Science**, [s. l.], v. 2024, n. 1, p. 1433973, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1155/2024/1433973>
- BORNMAN, L. Measuring impact in research evaluations: A thorough discussion of methods for, effects of, and problems with impact measurements. **Higher Education**, [s. l.], v. 73, n. 5, p. 775-787, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10734-016-9995-x>
- BORNMAN, L.; DANIEL, H. D. What do citation counts measure? A review of studies on citing behavior. **Journal of Documentation**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 45-80, 2008.
- BORNMAN, L.; HAUNSCHILD, R. The use of the journal impact factor in assessing research: Theoretical and empirical issues. **Springer Proceedings in Complexity**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 85-99, 2018.

CHADHA, P.; YADAV, P.; SHARMA, M.; SHARMA, Y.; NANGIA, R.; SHARMA, K.; MAKSUDOVNA, K. Global trends in waste materials: a bibliometric analysis. **Material Today Proceedings**, [s. l.], p. 10059, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.059>.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; PATNAIK, D. Forty-five years of Journal of Business Research: A bibliometric analysis. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 109, p. 1-14, 2021.

EU Commission. Horizon Europe: Promoting sustainability in industrial waste management. **European Union Reports**, 2023.

GARFIELD, E. The history and meaning of the journal impact factor. **JAMA**, v. 295, n. 1, p. 90-93, 2006.

GAVEL, Y.; ISILID, L. Web of Science and Scopus: a journal title overlap study. **Online Information Review**, v. 32, n. 1, p. 8-21, 2018.

HAUNSCHILD, R.; BORNEMANN, L.; LEYDESDORFF, L. Networks of reader and author keywords in journal publications. **Journal of Informetrics**, v. 14, n. 3, p. 421-435, 2020.

HICKS, D.; WOUTERS, P.; WALTMAN, L.; DE RIJCKE, S.; RAFOLS, I. The Leiden Manifesto for research metrics. **Nature**, v. 520, n. 7548, p. 429-431, 2015.

KUMAR, S. Systematic Literature Review and Bibliometrics. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333-339, 2019.

LI, Y.; WANG, Y.; SHEN, C.; XU, L.; YI, S.; ZHAO, Y. Microbiome in response to sewage sludge amendment in coastal mudflat soil. **Biology (Basel)**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1302, 2021. Doi: <http://doi.org/10.3390/biology10121302>.

MUNAWAR, S. Industrial Sludge Management and its Environmental Impacts. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 19, p. 24135-24154, 2021.

ORTIZ-REMEDE, C.; BONILLA-COSTA, J.; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, L. Big data and bibliometrics: A computational approach to research trends in databases. **Scientometrics**, v. 120, n. 3, p. 1281-1301, 2019.

PANDEY, B., *et al.* Advances in Metal Recovery from Electroplating Sludge: A Review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 423, p. 127562, 2022.

PRIEM, J. Altmetrics. **ASIS&T Annual Meeting**, v. 57, n. 1, p. 1-3, 2020.

SANTOS, J. *et al.* Sustainable sludge reuse in Brazil: Challenges and opportunities. **Journal of Environmental Management**, 2023.

SOUZA, R. *et al.* Circular economy and sludge reuse: Brazilian perspectives. **Environmental Science and Policy**, 2022.

SOUZA, T. S.; LACERDA, D.; AGUIAR, L. L.; MARTINS, M. N. C.; OLIVEIRA DAVID, J. A. Toxic potential of sewage sludge: histopathological effects on soil and aquatic bioindicators. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 111, p. 105980, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105980>.

SRIVASTAVA, R. R.; RAJAK, D. K.; ILYAS, S.; KIM, H.; PATHAK, P. Challenges, regulations, and case studies on sustainable management of industrial waste. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 51, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/min13010051>

UNESCO. **International scientific collaboration has become a must, says report.**

Disponível em: < <https://www.unesco.org/en/articles/international-scientific-collaboration-has-become-must-says-report>>. Acesso em: 06 set. 2024.

VERMA, A. K.; MEENA, M. C.; DATTA, S. P.; DWIVEDI, B. S.; GOLUI, D.; SINGH, V. K.; SHRIVASTAVA, M.; KUMAR, A. Effect on long-term integration of sewage-sludge and fertilizers on wheat productivity, profitability and soil fertility. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, Índia, v. 69, n. 1, 2021.

VOSVIEWER. **VOSviewer Manual**. Disponível em:

<https://www.vosviewer.com/documentation>. Acesso em: 10 jul. 2024.

WOUTERS, P.; RUSHFORTH, A. Quality indicators and research integrity. In: Handbook of Research Integrity. 2. ed. **Springer**, 2018. p. 465-479.

XIAO, J.; SHEN, J.; BAI, M.; GAO, Q.; WU, Y. Reuse of construction spoil in China: current status and future opportunities. **Journal of cleaner production**, [s. l.], v. 290, n. 1, p. 125742, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125742>

YALÇINTAS, D.; OGUZ, S.; ÖZELTÜRKAY, E. Y.; GÜLMEZ, M. Bibliometric analysis of studies on sustainable waste management. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 2, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/su15021414>.

ZHANG, X.; ZHAO, B.; LIU, H.; LI, L. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. **Environmental Technology and Innovation**, [s. l.], v. 26, p. 102288, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>.

ZHAO, Q.; CHU, S.; HE, D.; WU, D.; MO, Q.; ZENG, S. Sewage sludge application alters the composition and co-occurrence pattern of the soil bacterial community in southern China forestlands. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 157, p. 103744, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103744>.

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.

5. CAPÍTULO 2 – IMPACTO DE DIFERENTES DOSAGENS DE LODOS INDUSTRIAIS NO DESENVOLVIMENTO DA ALFACE

5.1. Resumo:

A disposição inadequada dos lodos industriais é uma problemática mundial. Dessa maneira, a busca por aplicações desses lodos em outros usos tem sido uma das alternativas. O uso agrícola oferece benefícios no sentido de promover fertilização dos solos. Contudo, deve-se tomar cuidado para não causar poluição pela carga de metais tóxicos. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar o desenvolvimento da alface, usada como bioindicador, sob diferentes concentrações de lodos de ETA, têxtil e galvanico. Para os tratamentos foram adicionadas diferentes dosagens dos lodos no solo, nas proporções de 1%, 5%, 10%, 25%, 50% e 75%. O solo e os lodos foram caracterizados em função de parâmetros físico-químicos pela análise do pH, condutividade elétrica, série de sólidos e a concentração de metais pesados (Zn, Al, Mn, Fe, Ni, Cd, Pb e Cr). As plantas foram avaliadas quanto a quantidade, comprimento, peso úmido e seco das folhas, bem como concentração dos metais para o cálculo do Fator de Bioacumulação (FBC). Não houve bioacumulação de Al em nenhum dos tratamentos. As plantas tiveram melhor desenvolvimento com lodo galvanico, evidenciado por melhores médias nos parâmetros analisados, bem como características fenotípicas de cor das folhas e tamanho das plantas. No galvanico, o FBC manteve-se < 1 para a maioria dos metais, não indicando bioacumulação. Em contrapartida, para os de ETA e têxtil o FBC manteve-se > 1 para todas as dosagens em Zn e destaque para Mn, Ni e Pb no têxtil. Esse resultado foi refletido no baixo desenvolvimento da alface para ambos. Ademais, foi possível fornecer subsídios para a aplicação dos lodos em plantas não consumidas *in natura* e assim mitigar impactos ambientais pela disposição indevida.

Palavras-chaves: Bioacumulação; Lodo de ETA; Lodo galvanico; Lodo têxtil.

5.2. Introdução

O lodo galvanico, gerado durante o tratamento de efluentes provenientes de processos de galvanoplastia, é um resíduo industrial de grande importância ambiental e econômica. A produção deste lodo ocorre predominantemente em etapas que envolvem a remoção de metais pesados e outros contaminantes dos efluentes galvanicos, com o objetivo de atender aos padrões ambientais e de saúde pública. O processo de produção do lodo galvanico começa com o tratamento dos efluentes ácidos ou básicos provenientes dos banhos de galvanoplastia, onde são aplicados métodos físicos e químicos para a separação dos metais em solução (Ferreira; Santos; Silva, 2021).

Na primeira etapa, conhecida como pré-tratamento, os efluentes são ajustados quanto ao pH e submetidos a processos de coagulação e floculação. Durante essa fase, aditivos químicos são utilizados para promover a aglutinação dos sólidos suspensos e precipitação dos metais pesados presentes, formando um lodo que é então separado por sedimentação ou flotação (Gonçalves *et al.*, 2021). Este lodo, rico em metais pesados como cromo, níquel e cobre, é uma preocupação ambiental significativa devido ao seu potencial de contaminação do solo e das águas subterrâneas.

O setor têxtil é uma das indústrias que mais consomem água e geram efluentes, resultando na produção significativa de lodo durante o tratamento dos resíduos líquidos. Esse lodo é composto principalmente por substâncias orgânicas e inorgânicas removidas durante o processo de purificação das águas residuais. A gestão adequada do lodo têxtil é um desafio ambiental, pois sua composição pode conter metais pesados, corantes e produtos químicos usados na fabricação dos tecidos, além de uma elevada carga orgânica (Lourenço *et al.*, 2022).

A produção desse lodo ocorre em diversas etapas do tratamento de efluentes, começando com o pré-tratamento, onde são removidos sólidos grandes e impurezas. Nesta fase inicial, os efluentes são submetidos a processos físicos e químicos, como a utilização de peneiras e coagulantes, que facilitam a remoção de resíduos sólidos e partículas em suspensão. O lodo formado neste estágio contém principalmente resíduos sólidos e partículas menores, que podem ser facilmente removidos através de processos físicos (Pedrini; Knop, 2024).

Por outro lado, embora o tratamento de água seja altamente vantajoso para a saúde humana ao fornecer água potável para consumo e atividades diversas, ele também resulta na geração significativa de resíduos sólidos, intrínseca ao processo, conhecidos como lodo de ETA. Nas convencionais, a formação do lodo ocorre devido ao uso de substâncias químicas, como coagulantes, que atuam na purificação da água ao aglomerar as partículas de impurezas. Essas partículas se acumulam nos tanques de decantação e nos filtros, sendo periodicamente lavadas (Oliveira; Rondon, 2016) e, consequentemente, originam o lodo nas etapas de coagulação e floculação (Nair; Ahammed, 2015).

O principal desafio associado à disposição ambiental do lodo proveniente de ETAs reside na presença, geralmente em concentrações significativas, do metal alumínio (Al) na forma de sulfato de Al. Conforme mencionado anteriormente, muitas ETAs optam por liberar seus resíduos nos cursos d'água a jusante da área de captação como método final de descarte, ou em áreas próximas às estações. A presença elevada de alumínio nesses lodos pode provocar

toxicidade nos organismos aquáticos e intensificar a degradação desses ambientes (Tavares *et al.*, 2019).

A adoção de lodos como substitutos para fertilizantes sintéticos apresenta-se também como uma alternativa vantajosa, ao considerar que os custos associados às operações e ao tratamento dos lodos são significativamente inferiores em comparação aos relacionados aos fertilizantes artificiais. Adicionalmente, o emprego desses lodos na agricultura possui uma forte dimensão de sustentabilidade, uma vez que sua reutilização propicia a incorporação de nutrientes presentes em resíduos originados em áreas urbanas nas culturas agrícolas. O manejo adequado é crucial para garantir a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais associados à sua disposição (Souza, 2021).

Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar o impacto da aplicação de lodos industriais no solo com a cultura da alface como bioindicador. A análise foi baseada na acumulação de metais pesados por meio do Fator de Bioacumulação (FBC).

5.3. Material e Métodos

5.3.1. Local de estudo e de coletas

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Departamento de Tecnologia Rural (DTR), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife – PE (figura 1). O município é a capital do estado, abrange uma área de 218,50 km². O clima é do tipo As', tropical chuvoso, de acordo com Köppen (Pereira *et al.*, 2002).

Figura 1. Casa de vegetação onde foi conduzido o experimento.



Fonte: Autora (2025).

O lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) foi proveniente da descarga de fundo dos decantadores de uma ETA convencional que pertence ao Sistema Gurjaú, no município do

Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco (figura 2). A ETA Gurjaú tem capacidade de tratamento de 2065 l/s, sendo administrada pela COMPESA. A logística de distribuição da água tratada para as cidades da Região Metropolitana do Recife é realizada com 7% para o Cabo, 36% para o Recife e 57% para Jaboatão dos Guararapes. Gurjaú é também uma Reserva Ecológica que abarca cerca de 200 nascentes e abriga diversas espécies de fauna e flora (Compesa, 2016).

Figura 2. Decantadores da Estação de Tratamento de Água do sistema Gurjaú.



Fonte: Autora (2025).

O lodo galvânico foi coletado de uma indústria de galvanoplastia de médio porte, localizada no Polo de Desenvolvimento Sustentável do Agreste – PDSA – MÓDULO II, Distrito Industrial de Caruaru. Nessa indústria é desenvolvida atividade de fabricação de objetos metálicos para os segmentos da confecção de roupas e de sapatos.

O lodo têxtil foi coletado do leito de secagem de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma das lavanderias do Polo Têxtil do Agreste de Pernambuco, na cidade de Caruaru. Essa ETE gera cerca de 7 toneladas de lodo mensalmente, sendo descartado em um aterro industrial localizado na mesma cidade.

O solo foi coletado na área de experimentação com cana-de-açúcar da UFRPE, em Carpina. Na área escolhida, com auxílio de um trado, foram retiradas cinco amostras simples de solo, de preferência com textura média, na profundidade de 0-20 cm e misturadas formando uma amostra composta de 300g. A amostra composta foi acondicionada em um saco plástico devidamente etiquetado (nome do proprietário, data de coleta e profundidade de coleta) e encaminhado para o laboratório de análise química.

5.3.2. Montagem e execução do experimento

O experimento foi montado em blocos inteiramente casualizados, formando um arranjo fatorial de seis tratamentos para cada lodo e uma testemunha, com três repetições em cada, perfazendo um total de 21 unidades experimentais em estudo. Cada unidade experimental continha 1000g, composta pelo solo e concentrações variáveis de lodo (Tabela 2).

Tabela 2. Composição dos tratamentos executados no experimento.

Tratamentos	Composição
Testemunha (T)	100% solo
LE01/ LG01/ LT01	1% lodo
LE05/ LG05/ LT05	5% lodo
LE10/ LG10/ LT10	10% lodo
LE25/ LG25/ LT25	25% lodo
LE50/ LG50/ LT50	50% lodo
LE75/ LG75/ LT75	75% lodo

Fonte: Autora (2025).

A irrigação foi determinada pelo ponto de início de drenagem nos vasos. Foram utilizadas como bioindicador de toxidez plantas de alface lisa (cultivar babá de verão manteiga) do lote 676628, com percentagem de germinação de 96% e pureza de 99,9% da empresa Feltrin Sementes. As sementes foram semeadas em placas de isopor com substrato inerte (pó de coco e arroz carbonizado). As mudas foram transplantadas para local definitivo com a terceira folha completamente expandida (figura 3). Durante toda a execução do experimento, na casa de vegetação, foram medidas a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) por meio de um higrômetro.

Figura 3. Bandeja de semeio com as mudas de alface prontas para o transplantio.



Fonte: Autora (2025).

O experimento foi finalizado 19 dias após o transplantio, pois algumas plantas no lodo têxtil e de ETA morreram. Após a colheita, foram separadas as folhas das raízes. Em seguida, realizada pesagem em uma balança analítica e limpeza com água potável para evitar resultado

cruzado proveniente do solo/lodo. As plantas foram avaliadas pelo número e comprimento de folhas e matéria fresca da parte aérea, visto que não foram obtidas amostras suficientes das raízes para as análises.

5.3.3. Análises laboratoriais e caracterização dos materiais

Os lodos coletados foram colocados para secar numa estufa à 65 °C, por 3 dias. A caracterização dos resíduos e do solo, consistiu na determinação de aspectos relacionados ao pH, condutividade elétrica, série de sólidos e concentrações de metais pesados. Os procedimentos de coleta, preservação, preparação e análise foram baseados no Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater (APHA, 2017) (quadro 1).

Quadro 1. Métodos utilizados para a caracterização dos materiais em estudo.

Parâmetro	Método - Referência
pH	4500-H+B
Condutividade elétrica	2F10B
Série de sólidos totais	2540 D
Metais	ICP-OES

Fonte: Autora (2025).

Anteriormente às análises químicas, as repetições de um mesmo tratamento foram agrupadas para formar uma amostra composta. Para os tratamentos nos quais alguma das repetições apresentou morte das plantas, os parâmetros da alface foram analisados considerando apenas a repetição sobrevivente, visto que não seria apropriado considerar valores nulos como representativos do comportamento do sistema. As amostras vegetais foram secas em estufa térmica com circulação de ar à 65 °C, por 24 horas. Após secagem, foram trituradas em um moinho do tipo Wiley para facilitar no procedimento de digestão (figura 4).

Figura 4. Moinho do tipo Wiley utilizado para triturar as folhas secas.



.Fonte: Autora (2025).

Para a digestão ácida, pesou-se 0,5 gramas de cada amostra composta. Contudo, nos tratamentos com peso menor de folhas foram feitas observações durante os cálculos. Terminado o procedimento no digestor microondas, as amostras foram transferidas para um balão volumétrico de 25 mL e completado o volume com água ultrapura (figura 5). Para retirar os resíduos foram utilizados papel filtro para filtração. Após digeridas foram encaminhadas para leitura dos metais pesados no equipamento ICP-OES, no laboratório de Química do Solo (LQS– UFRPE). Foram lidos alumínio (Al), cádmio (Cd), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn).

Figura 5. Digestor microondas utilizado no experimento.



Fonte: Autora (2025).

As amostras brutas foram identificadas como água (H₂O), testemunha (T), lodo têxtil (LTX), lodo de ETA (LE), lodo galvânico (LG) e folha (FT). As demais amostras foram diferenciadas acrescentando-se o F no início para as folhas e S para as com solo e lodo, seguido da porcentagem referida do lodo em números variando de 01 à 75.

Com base nas concentrações dos metais pesados foram calculadas as quantidades acumuladas nas folhas da planta, por meio do fator de bioacumulação (FBC) (Shi *et al.*, 2011), pela equação:

Fator de bioacumulação (FBC)

$$FBC = \frac{CPA}{Csolo}$$

Onde:

$CPA (mg. kg^{-1})$ = concentração do metal na parte aérea;

$Csolo (mg. kg^{-1})$ = concentração de metais disponível no solo para as plantas

5.3.4. Análise de dados

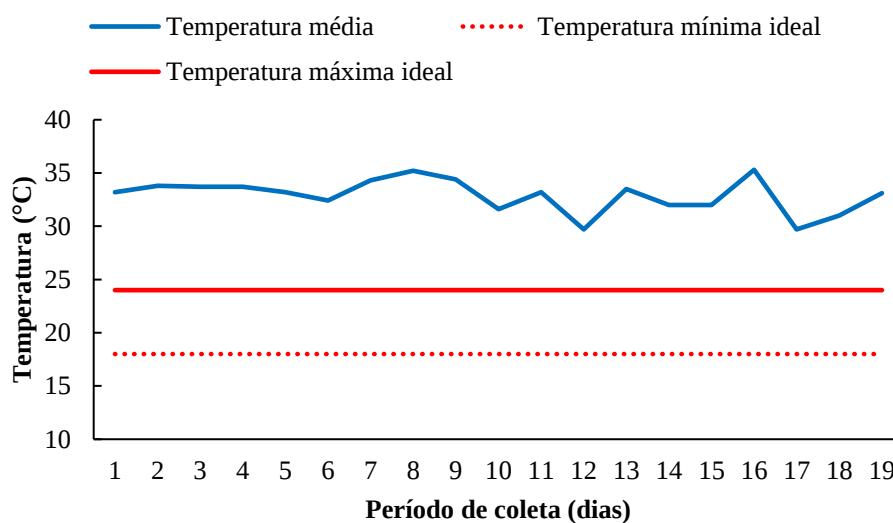
Os dados de número e comprimento de folhas do tratamento com lodo galvânico foram tabulados e submetidos à análise de variância *one-way* ANOVA, seguido pelo teste de médias de Tukey ($p < 0,05$). Para os dados com os lodos têxtil e de ETA, não adequados para a ANOVA, foi realizada a análise de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn ($p < 0,05$). Para os dados da leitura dos metais foram feitas equações e encontrado o valor do coeficiente de determinação (R^2). Foram utilizados os softwares Excel e Past.

5.4. Resultados e Discussão

5.4.1. Temperatura e Umidade

Durante todo o período de medição observou-se que a temperatura média permaneceu acima da faixa considerada ideal, com valores variando entre 29°C e 35°C (figura 6). Essa condição pode indicar um estresse térmico para o cultivo da alface, uma vez que tem como temperaturas mínima e máxima recomendadas cerca de 18°C até 25°C. A ausência de temperaturas dentro da faixa ideal sugere que fatores climáticos podem ter influenciado o crescimento e o metabolismo da cultura (Walter; Minuzzi; Conceição, 2024).

Figura 6. Variação da temperatura na casa de vegetação durante o experimento.



Fonte: Autora (2025).

A umidade relativa do ar, mostrou-se bastante variável ao longo do período analisado, oscilando entre 53% e 79%. Para o cultivo de alface, a umidade relativa ideal situa-se entre 50% e 70%. Nos dias em que a umidade ultrapassou os 60%, o ambiente pode ter sido mais favorável ao crescimento da alface, mas com um risco potencial de doenças, especialmente em combinação com as temperaturas elevadas (Bittencourt *et al.*, 2024). Essa combinação sugere que o ambiente não foi ideal para o cultivo da alface, apresentando-se instável.

Em situações em que a temperatura e a umidade dentro de casas de vegetação permanecem fora do intervalo ideal, as plantas apresentam menor concentração de matéria seca e menor capacidade de armazenamento de água. O manejo cuidadoso de outros fatores ambientais se torna crucial para minimizar os impactos negativos no desenvolvimento da cultura. O ajuste adequado desses fatores pode ajudar a compensar, em parte, os efeitos adversos causados pelo calor excessivo (Rodrigues *et al.*, 2022).

5.4.2. Caracterização do solo, dos lodos e dos tratamentos

Os parâmetros físico-químicos e concentrações de metais pesados foram avaliados nas diferentes amostras analisadas, incluindo da água utilizada para irrigação. Esses dados ajudaram a compreender a influência dos lodos no solo e seus possíveis impactos ambientais (tabela 3)

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos e de concentração de metais pesados na água, nos lodos e no solo.

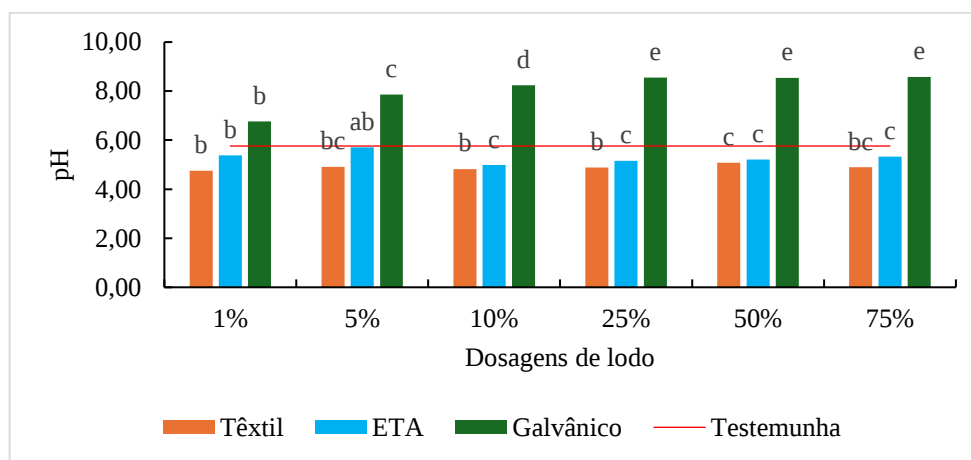
Amostras	Parâmetros											
	pH	CE	ST	SF	SV	Al	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Água	6,01	147,37	-	-	-	5,50	0,00	13,40	0,65	0,05	0,00	0,30

LTX	5,01	15,91	89,47	59,88	29,59	28854,21	29,42	4115,48	2316,51	13,06	5,73	145,59
LE	5,70	471,40	96,99	81,27	15,72	36266,48	27,07	44996,00	70,67	11,44	18,28	70,91
LG	8,49	5,87	95,69	84,19	11,50	16366,91	1213,03	4352,02	51,66	4207,63	18,93	14558,35
T	5,76	110,60	99,60	96,54	3,06	3459,97	13,81	6883,19	26,57	0,60	5,02	3,87

pH – Potencial hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica (dS.m⁻¹); ST – Sólidos totais (%); SF – Sólidos fixos (%); SV – Sólidos voláteis (%); Al – Alumínio (mg.kg⁻¹); Cd – Cádmio (WTW); Cr – Crômio (mg.kg⁻¹); Fe – Ferro (mg.kg⁻¹); Mn – Manganês (mg.kg⁻¹); Ni – Níquel (mg.kg⁻¹); Pb (mg.kg⁻¹); Zn – Zinco (mg.kg⁻¹).

A adição dos lodos ao solo resultou em respostas distintas no pH (figura 7). O galvânico deixou o pH alcalino, o que pode estar relacionado à presença de compostos alcalinos ou metais como o zinco, que possuem efeito neutralizante no solo (Kicinska; Pomykata; Diaz-Izquierdo, 2022; Zhang *et al.*, 2018). O aumento no pH pela adição de lodo também foi observado por Nunes, Cabral, López-Piñeiro (2008). Por outro lado, os lodos têxtil e de ETA mantiveram o pH mais ácido, próximo ou abaixo ao da testemunha. Esse fato possivelmente ocorreu devido à liberação de ácidos orgânicos ou íons acidificantes, como sulfatos.

Figura 7. Variação do pH em relação ao solo após a adição de diferentes dosagens de lodo têxtil, de ETA e galvânico.



As dosagens com $p < 0,05$ indicaram diferença estatisticamente significativa em relação a testemunha pelo teste de Tukey. Para o têxtil os resultados foram LT01 ($p < 0,001$), LT05 ($p < 0,001$), LT10 ($p < 0,001$), LT25 ($p < 0,001$), LT50 ($p < 0,001$) e LT75 ($p < 0,001$). Para o galvânico foram: LG01 ($p < 0,001$), LG05 ($p < 0,001$), LG10 ($p < 0,001$), LG25 ($p < 0,001$), LG50 ($p < 0,001$) e LG75 ($p < 0,001$). Para o de ETA foram: LE01 ($p = 0,0283$), LE05 ($p = 0,9982$), LE10 ($p < 0,001$), LE25 ($p < 0,001$), LE50 ($p < 0,001$) e LE75 ($p = 0,0100$).

Fonte: Autora (2025).

As alterações de pH têm implicações diretas na mobilidade de metais pesados. Nesse sentido, solos mais alcalinos tendem a reduzir a solubilidade e a biodisponibilidade de metais tóxicos, como o cádmio, ao passo que pH mais ácido pode intensificar o risco de contaminação e toxicidade ambiental (Oubane *et al.*, 2021). Pequenas flutuações no pH podem impactar a eficiência fotossintética e o crescimento das raízes. Essas observações são importantes para

ajustar tanto o pH quanto a CE nas práticas agrícolas para otimizar o rendimento e a qualidade da alface (Kudirka *et. al.*, 2023).

A CE, em geral, apresentou valores abaixo de $1,0 \text{ dS.m}^{-1}$, sendo um indicativo de carência de nutrientes essenciais, como nitrogênio e potássio. Embora uma CE moderada possa significar maior disponibilidade de nutrientes, valores elevados, podem causar salinização do solo, levando ao estresse osmótico nas plantas e comprometendo o desenvolvimento das plantas. Isso sugere a necessidade de dosagens controladas para evitar toxicidade por sais (Shan *et al.*, 2021).

Com relação a série de sólidos, os resultados demonstraram que, à medida que a concentração de lodo aumentou, observou-se uma diminuição significativa dos sólidos fixos (SF) e um aumento concomitante nos sólidos voláteis (SV) em todos os tratamentos (Tabelas 4, 4.1 e 4.2). Esse comportamento sugere que, com maior presença de lodo, ocorre uma maior decomposição da matéria orgânica (Morselli *et al.*, 2022). Tais resultados indicam que a interação entre a concentração de lodo e a composição de sólidos pode ser importante para entender os efeitos dos diferentes tipos de lodo nos processos de decomposição e estabilização. Embora o teor de umidade dos lodos não tenha sido analisado neste estudo, os dados de sólidos fixos e voláteis fornecem informações relevantes sobre a composição inorgânica e orgânica dos tratamentos.

Tabela 4. Valores da série de sólidos para os tratamentos com lodo de ETA.

Tratamentos	ST	SF	SV
T	99,60	96,54	3,06
LE01	98,91	95,91	3,01
LE05	99,35	95,74	3,61
LE10	99,12	95,02	4,10
LE25	98,83	92,79	6,04
LE50	98,22	89,22	9,00
LE75	97,52	85,88	11,63

Tabela 4.1 Valores da série de sólidos para os tratamentos com lodo têxtil.

Tratamentos	ST	SF	SV
T	99,60	96,54	3,06
LT01	99,60	95,96	3,16
LT05	99,21	94,69	4,52
LT10	99,07	94,17	4,90
LT25	97,92	90,06	7,86
LT50	96,28	83,86	12,43

LT75	96,13	82,47	13,66
------	-------	-------	-------

Tabela 4.2. Valores da série de sólidos para os tratamentos com lodo galvânico.

Tratamentos	ST	SF	SV
T	99,60	96,54	3,06
LG01	99,42	96,24	3,18
LG05	99,33	95,93	3,40
LG10	99,07	95,10	3,97
LG25	98,62	93,88	4,74
LG50	97,38	90,89	6,50
LG75	95,75	86,68	9,08

ST – Sólidos totais (%); SF – Sólidos fixos (%); SV – Sólidos voláteis (%)

As concentrações de metais pesados foram analisadas nos tratamentos de cada um dos três tipos de lodos utilizados no experimento. Esses dados foram fundamentais para avaliar os riscos de contaminação do solo e das plantas, além de verificar a viabilidade do uso agrícola de acordo com os limites normativos impostos pela Resolução CONAMA 420/2009 (tabela 5).

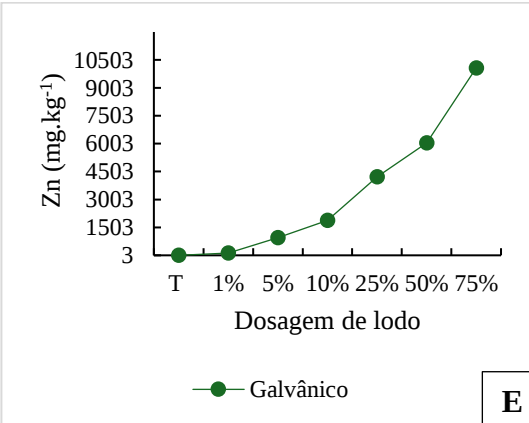
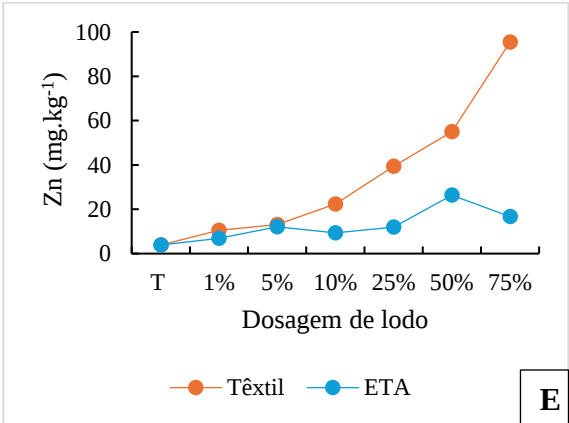
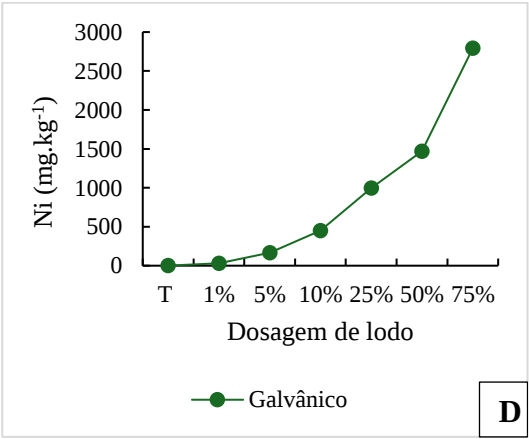
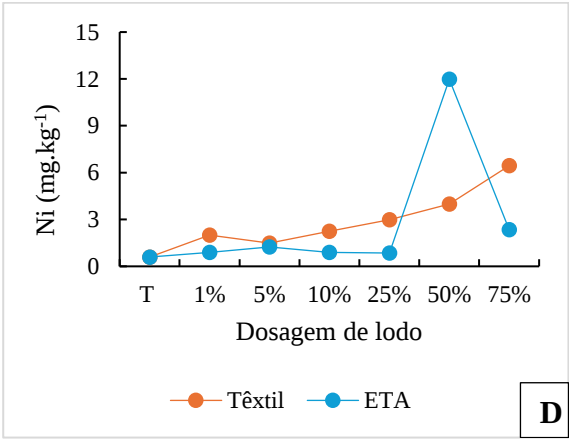
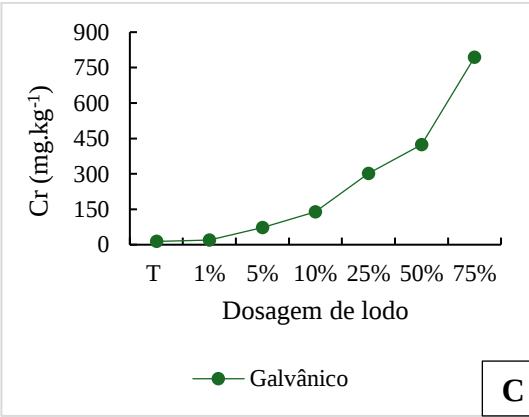
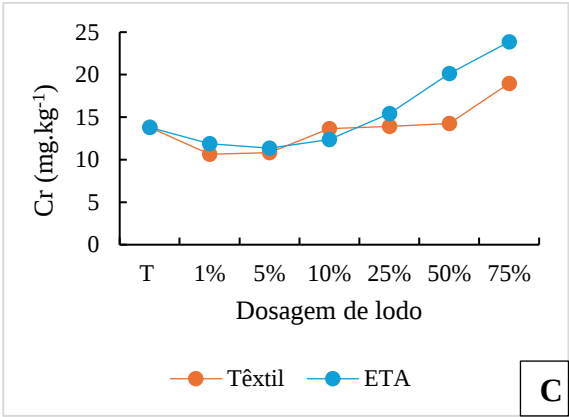
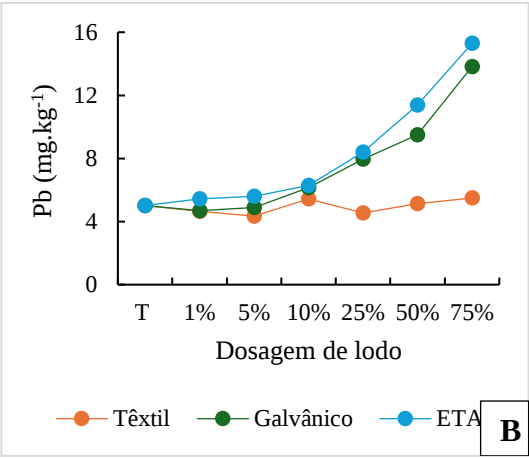
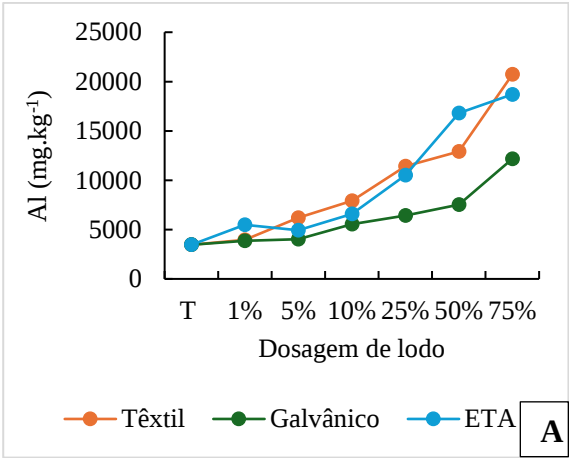
Tabela 5. Valores máximos de concentração de metais pesados em solo agrícola.

Substâncias químicas	Concentração máxima permitida (mg.kg ⁻¹)
Cádmio	3
Chumbo	180
Crômio	150
Níquel	70
Zinco	450

Adaptado de Resolução CONAMA 420/2009

A análise permitiu identificar diferenças importantes entre os lodos, refletindo suas características químicas e influência na composição do solo (figura 8).

Figura 8. Concentração de metais encontrados no solo após adição dos lodos têxtil, galvânico e de ETA em diferentes dosagens.



As equações e coeficientes de determinação para cada metal referentes aos lodos têxtil, galvânico e ETA, foram respectivamente: Al ($y = 2674,9x - 1188,1$ | $R^2 = 0,90$; $y = 1281,3x + 1016,6$ | $R^2 = 0,83$; $y = 2639,5x - 1060,4$ | $R^2 = 0,88$); Pb ($y = 0,0925x + 4,5748$ | $R^2 = 0,20$; $y = 1,3955x + 1,8457$ | $R^2 = 0,82$; $y = 1,6255x + 1,7017$ | $R^2 = 0,83$); Cr ($y = 0,9226x + 10,03$ | $R^2 = 0,52$; $y = 120,54x - 230,45$ | $R^2 = 0,85$; $y = 1,8107x + 8,3014$ | $R^2 = 0,68$); Ni ($y = 0,8229x - 0,4698$ | $R^2 = 0,85$; $y = 431,55x - 882,44$ | $R^2 = 0,84$; $y = 0,9642x - 1,1718$ | $R^2 = 0,25$); Zn ($y = 13,924x - 21,49$ | $R^2 = 0,86$; $y = 1616,9x - 3141,1$ | $R^2 = 0,89$; $y = 2,7645x + 1,3875$ | $R^2 = 0,65$).

- Alumínio

O Al apresenta implicações práticas importantes no contexto do uso agrícola, ainda que não tenha regulação específica. Com o aumento das dosagens, os lodos de ETA e têxtil apresentaram maiores valores (figura 8A). A alta concentração desse elemento pode representar um risco à toxicidade do solo, especialmente em condições de pH ácido (ETA e têxtil). Nessas condições, o Al se torna mais disponível na forma de íons (Al^{3+}), liberados para a solução do solo. Esses íons ocupam posições de troca catiônica, substituindo outros cátions removidos pela lixiviação. Apesar de sua concentração na solução do solo ser baixa, o Al^{3+} é altamente tóxico para a maioria das plantas. Essa toxicidade afeta diretamente as raízes, prejudicando seu crescimento, bloqueando os mecanismos de absorção e transporte de água e nutrientes e, consequentemente, comprometendo o desenvolvimento radicular e de biomassa (Shetty *et al.*, 2021)

- Chumbo

Observou-se que a concentração de chumbo aumentou proporcionalmente ao incremento da dosagem de lodo, sendo esse efeito mais acentuado para os lodos de ETA e galvânico (figura 8B). A dosagem a partir de 10% sugere que esses materiais possuem maior capacidade de liberação de Pb em condições crescentes. Por outro lado, o lodo têxtil apresentou um incremento moderado ao longo das dosagens. Em todos os lodos a concentração manteve-se abaixo do limite estabelecido (180 mg.kg^{-1}). O Pb, por sua vez, não é essencial para as plantas e apresenta alta toxicidade para organismos vivos, acumulando-se em áreas agrícolas e representando um risco à segurança alimentar (Zheng *et al.*, 2024).

- Crômio

O Cr apresentou variação moderada dentro dos tratamentos de ETA e têxtil, com valores similares e próximos ao da testemunha ($13,81 \text{ mg.kg}^{-1}$). Isso indica que esses lodos não foram uma fonte significativa de Cr. No entanto, no galvânico a concentração foi bastante elevada, alcançando o maior valor na dosagem de 75% ($793,25 \text{ mg.kg}^{-1}$), ultrapassando o limite estabelecido (150 mg.kg^{-1}) a partir de 10% (figura 8C). O elemento Cr, dependendo de sua forma química (Cr^{3+} ou Cr^{6+}), pode ter diferentes graus de toxicidade. Estudos de Xu *et al.* (2020)

destacam que o Cr^{3+} , geralmente predominante em ambientes anaeróbicos, pode ser menos tóxico e até benéfico em traços para algumas culturas, enquanto o Cr^{6+} é altamente tóxico e carcinogênico. Portanto, a aplicação do lodo deve ser acompanhada de análises químicas para determinar a especiação.

- Niquel

A concentração de Ni nos lodos têxtil e de ETA apresentou um aumento gradual com valores abaixo de 12 mg.kg^{-1} . Em contraste, o galvânico demonstrou um incremento atenuado, com concentrações que passaram de valores residuais na testemunha ($0,60 \text{ mg.kg}^{-1}$) para cerca de 750 mg.kg^{-1} e assim ultrapassou o limite de 30 mg.kg^{-1} estabelecido, a partir da dosagem de 5% (figura 8D). O Ni é um metal potencialmente tóxico. Em altas doses pode reduzir a atividade microbiana do solo e prejudicar o metabolismo das plantas, como observado por Farsang *et al.* (2020). Contudo, em doses controladas, o Ni é essencial para a fixação biológica de nitrogênio em leguminosas, o que abre a possibilidade de aproveitamento em culturas específicas.

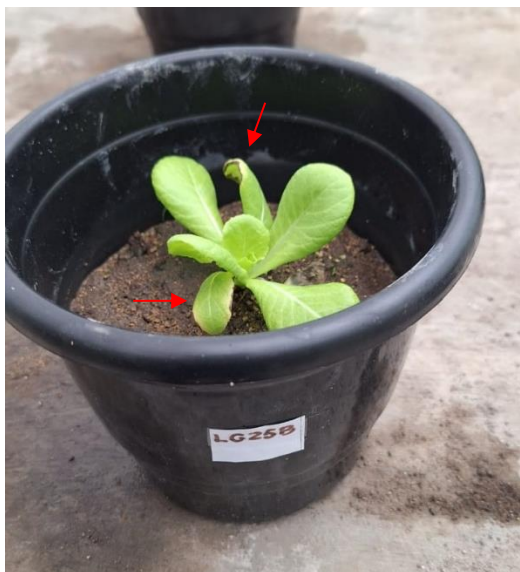
- Zinco

O Zn alcançou valores acima de $10.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ no galvânico que ultrapassou o limite de 480 mg.kg^{-1} . Em contraste, o lodo têxtil apresentou um aumento progressivo e constante, atingindo cerca de 90 mg.kg^{-1} e o de ETA estabilizou-se em torno de 20 mg.kg^{-1} nas doses mais elevadas (figura 8E). O Zn, essencial para o metabolismo das plantas, pode causar toxicidade em excesso, afetando a fotossíntese e o crescimento radicular (Kume *et al.*, 2021).

5.4.3. Parâmetros da alface

Em algumas folhas foi observado o sintoma chamado de “tip burn”, caracterizado por necrose dos tecidos da margem de folhas jovens e maduras e no ápice da planta (figura 9). A causa pode estar associada a mudanças de temperatura e aumento da umidade. Como também pode ser causado por deficiência fisiológica de cálcio, devido ao transporte insuficiente para os órgãos de crescimento e baixa absorção nas raízes (Cecílio Filho *et al.*, 2020).

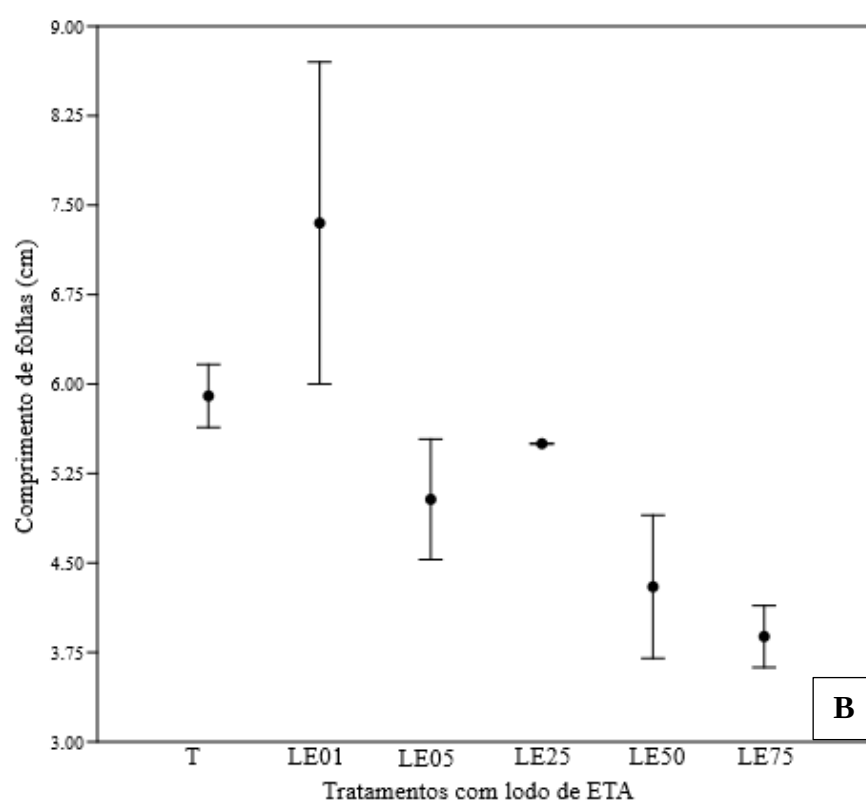
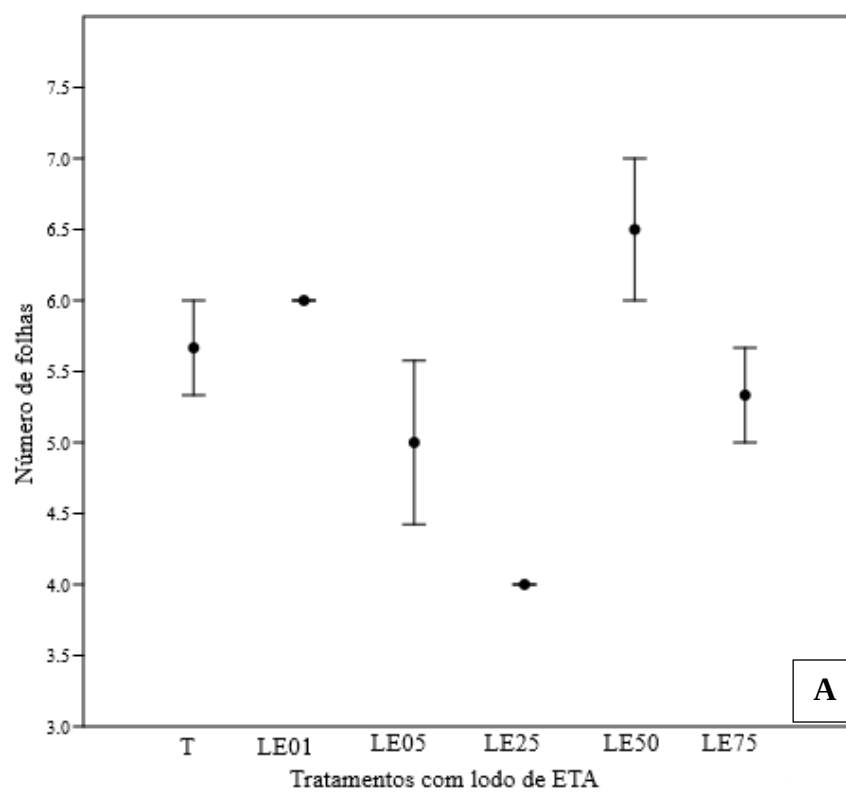
Figura 9. Folhas de alface apresentando necrose nas margens.

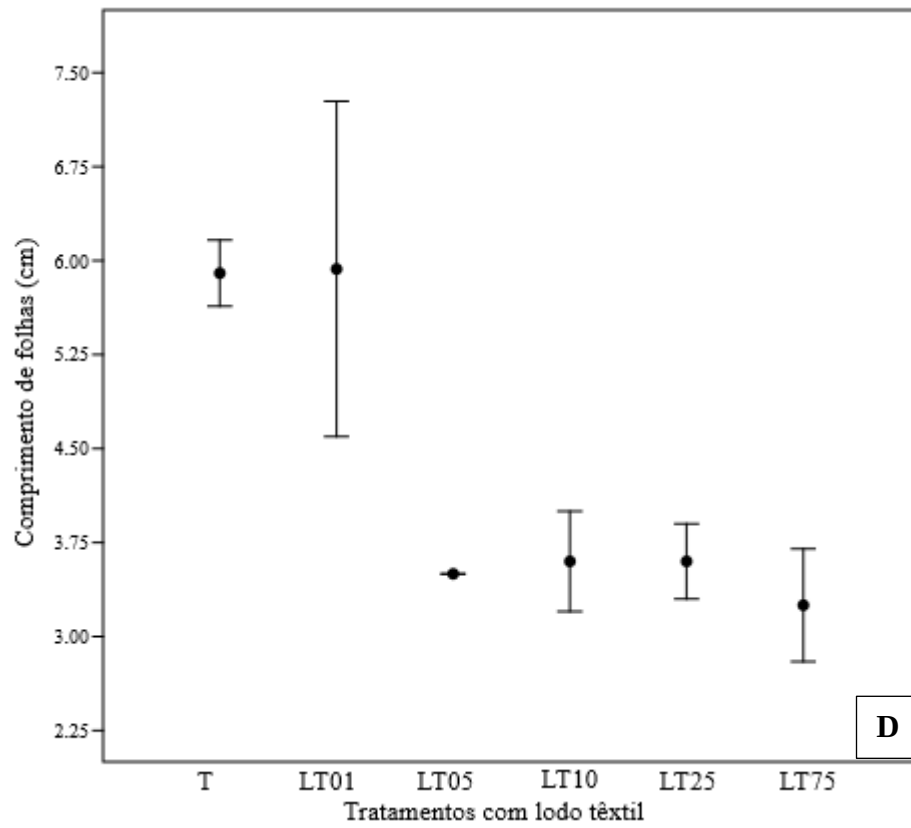
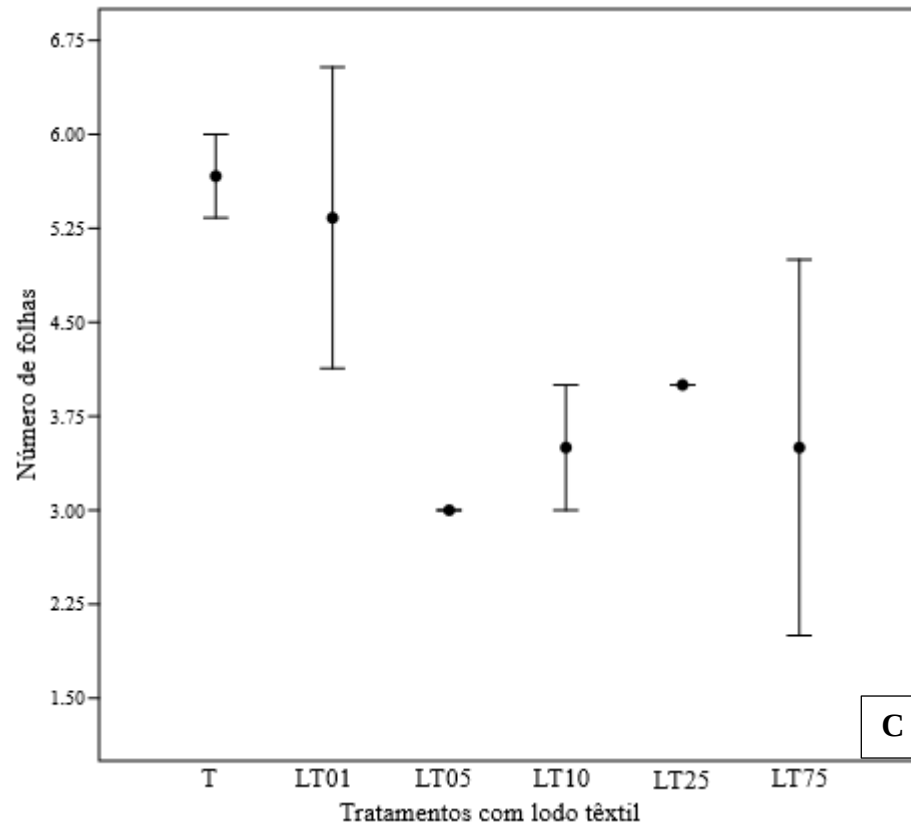


Fonte: Autora (2025).

Na avaliação ao final do experimento, observou-se a morte de todas as plantas dos tratamentos LE10 e LT50 (figura 10). Contudo, não houve evidências para atribuir a causa desse efeito exclusivamente às dosagens dos respectivos lodos. Visto que as plantas submetidas a dosagens mais elevadas dentro de cada tratamento sobreviveram. Contudo, o sistema radicular não desenvolveu bem em nenhum dos lodos. Logo, não foi possível avaliar esse parâmetro.

Figura 10. Relação entre o número e comprimento de folhas de alface. Em 10.A. e 10.B., respectivamente, para número e comprimento de folhas no lodo de ETA. Em 10.C. e 10.D., respectivamente, para número e comprimento de folhas no lodo têxtil.

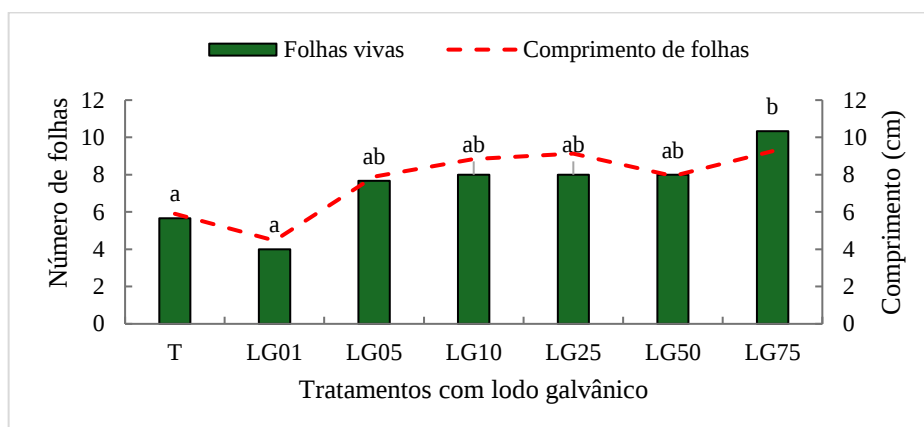




Intervalos verticais indicam o erro-padrão. As médias não diferiram para nenhum dos parâmetros pelo teste de Dunn ($p < 0,05$).

Em termos gerais, as plantas submetidas ao tratamento com lodo galvânico apresentaram melhor desenvolvimento para todos os parâmetros avaliados (figura 11).

Figura 11. Relação entre o número e comprimento de folhas de alface, submetida a diferentes concentrações de lodo galvânico.



Cada tratamento foi comparado com a testemunha por One-way ANOVA. Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No galvânico, o número de folhas variou significativamente no tratamento LG75 em relação à T e LG01 (figura 11). A partir de LG05, houve aumento no número de folhas vivas, mas sem diferenças significativas entre as dosagens intermediárias até LG50. Na avaliação do comprimento, os resultados da ANOVA indicaram a existência de variações gerais entre os tratamentos ($p = 0,0361$), mas as diferenças entre os pares não foram estatisticamente significativas quando avaliadas pelo teste de Tukey. Em contraponto, na análise desses parâmetros para os lodos de ETA e têxtil não houve diferenças significativas. Nesses lodos, as plantas tiveram menor desenvolvimento no crescimento, com pouca produção de massa na parte aérea, com média geral de 5,23g e 4,61g no de ETA e têxtil, respectivamente (figura 12).

Figura 12. Plantas de alface desenvolvidas sob tratamentos com lodo galvânico, têxtil e de ETA na dosagem de 75%.



Fonte: Autora (2025).

Esses resultados indicam que a origem e composição dos lodos tiveram influência direta na resposta das plantas, corroborando estudos que destacam a variabilidade dos efeitos agrônômicos em função das características químicas e biológicas dos resíduos aplicados (Antunes; Cardoso; Landa, 2021). O baixo desenvolvimento da alface no lodo de ETA e têxtil, possivelmente decorreu de uma sinergia entre toxicidade de metais pesados (especialmente Al, Cr, Fe e Mn) e deficiência nutricional severa devido à baixa CE. Essa combinação criou um ambiente inóspito para o crescimento da planta, causando estresse oxidativo, redução da atividade enzimática e comprometimento do metabolismo geral (Ramos; Alves; Lima, 2017).

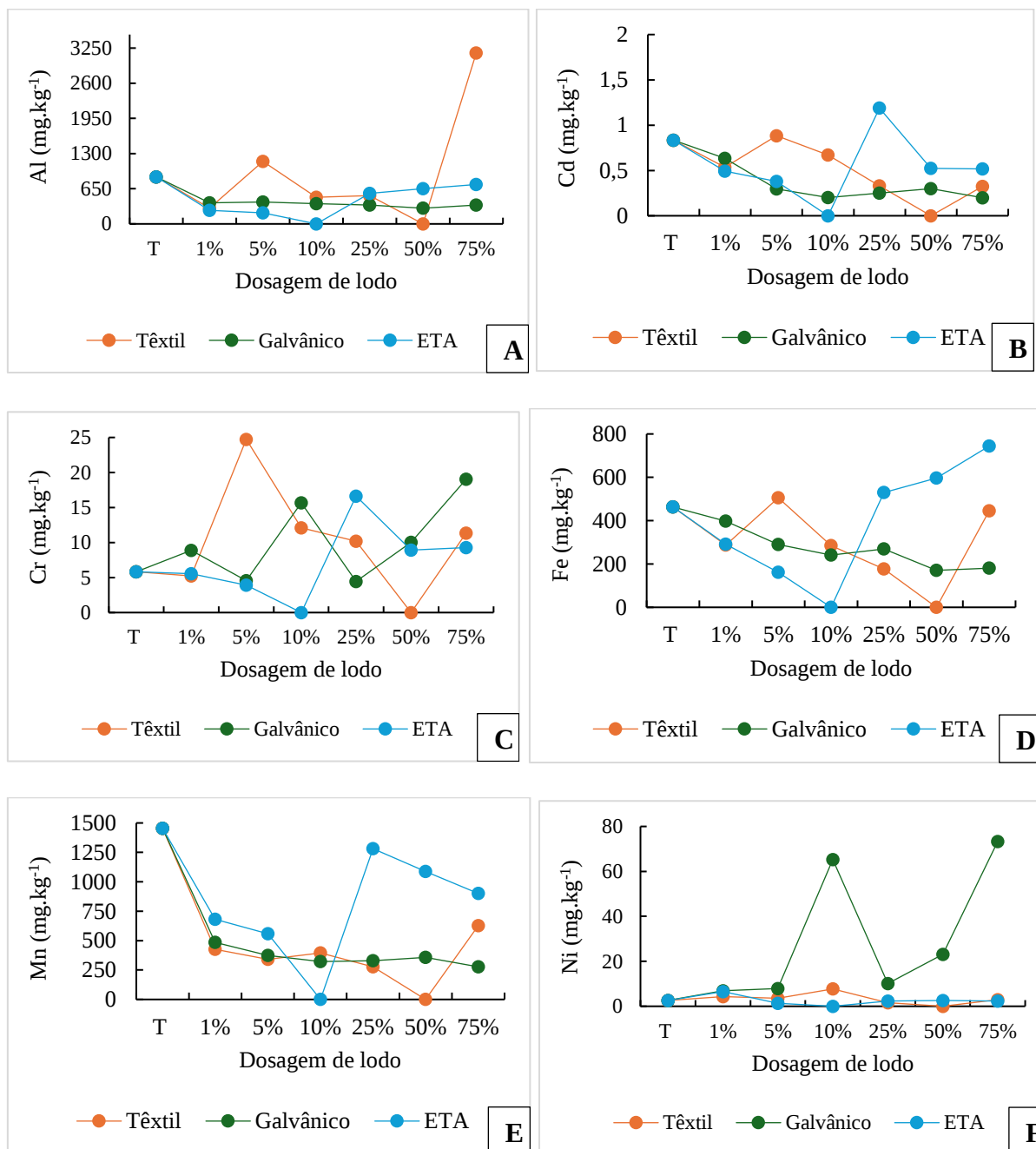
Pesquisas sobre o lodo de ETA indicam que quando adequadamente tratado, podem ser utilizados como condicionadores de solo, fornecendo nutrientes essenciais para as plantas e melhorando as propriedades físicas do solo. Por exemplo, um estudo realizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP) avaliou a biodegradabilidade desse lodo aplicado ao solo, observando que houve aumento do potencial agrônômico da mistura, sem apresentar fitotoxicidade às plantas (Embrapa Clima Temperado). Um outro estudo avaliou os efeitos do lodo têxtil combinado com água residuária da suinocultura na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*, observando que a utilização de até 75% de lodo têxtil no substrato resultou em mudas com desenvolvimento satisfatório. No entanto, a proporção de 100% apresentou efeitos negativos no crescimento das plantas, sugerindo a necessidade de combinações adequadas com outros componentes para otimizar os resultados (Pelissari *et al.*, 2009).

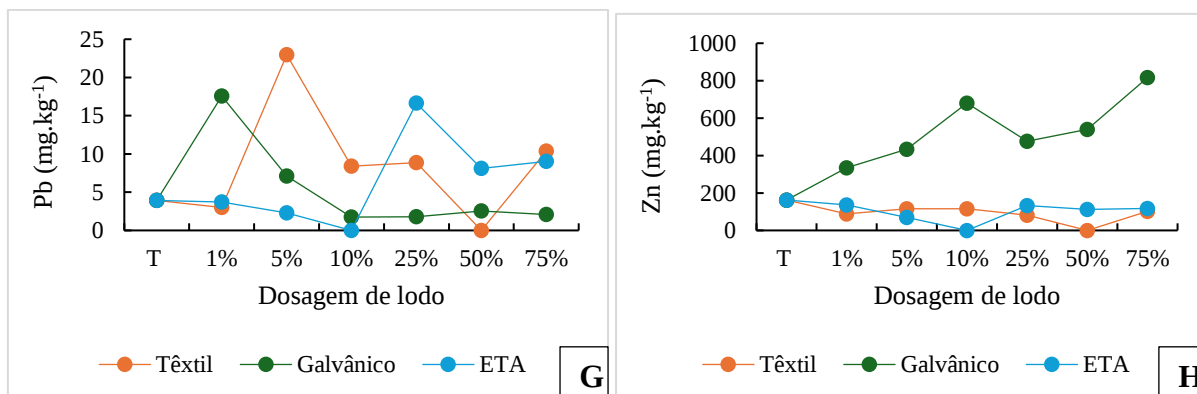
5.4.4. Bioacumulação dos metais pesados nas folhas

Durante a análise da concentração de metais nas folhas, foram identificados alguns possíveis pontos atípicos. Embora o valor seja extremo em relação aos demais dados, foi mantido na análise forma a preservar a integridade dos dados coletados. Assim, esse resultado foi

interpretado com cautela, mas não comprometeu as tendências gerais observadas nos demais tratamentos (figura 13).

Figura 13. Concentração de metais encontrados nas folhas da alface após adição dos lodos têxtil, galvânico e de ETA em diferentes dosagens.





As equações e coeficientes de determinação para cada metal referentes aos lodos têxtil, galvânico e ETA, foram respectivamente: Al ($y = 202,36x + 117,45$ | $R^2 = 0,17$; $y = -65,203x + 692$ | $R^2 = 0,51$; $y = 26,322x + 361,67$ | $R^2 = 0,03$); Cd ($y = -0,1127x + 0,9616$ | $R^2 = 0,59$; $y = -0,0935x + 0,7613$ | $R^2 = 0,67$; $y = -0,0031x + 0,5746$ | $R^2 = 0$); Cr ($y = -0,3048x + 11,138$ | $R^2 = 0$; $y = 1,4922x + 3,8015$ | $R^2 = 0,32$; $y = 1,0625x + 2,9138$ | $R^2 = 0,19$); Fe ($y = -34,166x + 445,49$ | $r^2 = 0,17$; $y = -47,124x + 475,75$ | $R^2 = 0,88$; $y = 65,104x + 137,42$ | $R^2 = 0,29$); Mn ($y = -121,56x + 989,49$ | $R^2 = 0,33$; $y = -136,86x + 1061,8$ | $R^2 = 0,50$; $y = -4,3858x + 869,6$ | $R^2 = 0$); Ni ($y = -0,3417x + 4,6113$ | $R^2 = 0,09$; $y = -8,8033x - 8,1623$ | $R^2 = 0,41$; $y = -0,2774x + 3,6639$ | $R^2 = 0,09$); Pb ($y = -0,0281x + 8,3308$ | $R^2 = 0$; $y = -1,4596x + 11,092$ | $R^2 = 0,30$; $y = 1,3742x + 0,7459$ | $R^2 = 0,28$); Zn ($y = -14,002x + 151,07$ | $R^2 = 0,37$; $y = 86,145x + 147,3$ | $R^2 = 0,74$; $y = -4,3011x + 121,76$ | $R^2 = 0,03$).

Juntamente com as observações sobre a concentração de metais nas folhas, foram realizadas comparações com relação ao FBC calculado para cada um dos tratamentos e os possíveis riscos da bioacumulação (tabela 6). Não foi possível realizar o cálculo para o Cd, Fe e Mn, pela não quantificação durante a leitura.

Tabela 6. Valores calculados para o Fator de Bioacumulação de metais nas folhas de alface.

Tratamentos	Fator de bioacumulação				
	Al	Cr	Ni	Pb	Zn
T	0,25	0,42	4,4*	0,78	41,9*
FLE01	0,05	0,47	7,29*	0,68	20,06*
FLE05	0,04	0,33	1,12*	0,41	5,79*
FLE10	-	-	-	-	-
FLE25	0,05	1,08*	2,81*	1,98*	11,14*
FLE50	0,04	0,44	0,22	0,71	4,25*
FLE75	0,04	0,39	0,99	0,59	7,06*
FLG01	0,10	0,46	0,24	3,75*	2,6*
FLG05	0,10	0,06	0,05	1,45*	0,46
FLG10	0,07	0,11	0,15	0,28	0,36
FLG25	0,05	0,01	0,01	0,23	0,11
FLG50	0,04	0,02	0,02	0,27	0,09
FLG75	0,03	0,02	0,03	0,15	0,08
FLT01	0,07	0,49	2,14*	0,64	8,49*
FLT05	0,19	2,29*	2,39*	5,29*	8,81*

FLT10	0,06	0,89	3,43	1,54*	5,18*
FLT25	0,05	0,73	0,55	1,96*	2,06*
FLT50	-	-	-	-	-
FLT75	0,15	0,60	0,45	1,89*	1,07*

Valores abaixo de 1, indicam não acumulação; valores iguais a 1, indicam equilíbrio; valores acima de 1, indicam bioacumulação; *indicação de valores positivos para bioacumulação.

A concentração de Al nas folhas no tratamento com ETA apresentou uma leve tendência de aumento, assim como no têxtil. Em contraste, o galvânico exibiu os menores valores de Al ao longo de todas as dosagens, com concentrações em torno de 650 mg.kg^{-1} , refletindo menor solubilidade em ambiente alcalino (figura 13A). Contudo, não foi constatado bioacumulação para nenhum dos lodos.

O Cd mesmo em concentrações baixas pode significar alto risco de toxidez. Yuan; Xue; Han (2021) constataram que geralmente os solos urbanos são mais contaminados do que os de áreas rurais e atribuíram esse fator à origem industrial, como indústrias químicas, disposição de lodos e manufatura. Nesse estudo, foi atribuído ao Cd a maior parcela de contaminação. Já Cr apresentou flutuações nos valores para todos os lodos, sugerindo que a interação com o solo e a planta pode ser mais influenciada por fatores específicos (figura 13C). Para esse metal, houve bioacumulação nos tratamentos LT05 e LE25.

A concentração inicial de Fe na testemunha foi relativamente alta. No galvânico, seguiu um padrão mais estável em relação aos outros lodos (figura 13D). Nesse caso, o ambiente alcalino pode ter limitado a solubilidade e absorção do Fe pelas plantas, refletindo menores flutuações. No entanto, no de ETA à medida que a dosagem aumentou, foi observada tendência de aumento também da concentração. A absorção de Fe pela alface é influenciada por diversos fatores, incluindo a disponibilidade no meio de cultivo, o pH do solo ou da solução nutritiva e as práticas de manejo adotadas. Além disso, a biofortificação da alface com ferro em sistemas hidropônicos tem sido estudada como uma estratégia para aumentar o teor desse micronutriente nas folhas, visando melhorar seu valor nutricional (Silva, 2023; Dasgan *et al.*, 2023).

O Mn apresentou o maior valor na testemunha. Observou-se uma redução acentuada da concentração de Mn nas menores dosagens (1% e 5%) para os três tipos de lodo, sugerindo que a diluição do lodo minimiza a transferência de Mn para as plantas (figura 13E). Em altas dosagem, o de ETA foi o que mais contribuiu para o aumento desse elemento. Para o Ni, à medida que a dosagem aumentou, o galvânico apresentou picos acentuados na concentração, indicando uma maior liberação e biodisponibilidade desse metal para a planta. Por outro lado, os lodos têxtil e de ETA mantiveram a concentração relativamente estáveis e baixas, mesmo nas maiores

dosagens (figura 13F). Houve bioacumulação nos tratamentos FLE01, FLE05, FLE25, FLT01, FLT05, FLT20 e, inclusive em T.

O Pb em baixas dosagens (1% e 5%) apresentou um aumento variável na concentração de Pb, sugerindo uma maior disponibilidade inicial no têxtil e galvânico. À medida que as dosagens aumentaram, o galvânico manteve concentrações mais baixas ao longo de todas as dosagens (figura 13G). Houve bioacumulação em FLE25, FLG01, FLG05, FLT05, FLT10, FLT25 e FLT75. A concentração de Zn no tratamento galvânico apresentou o maior impacto, com uma tendência crescente de acumulação de Zn nas folhas à medida que a dosagem aumentou. Em contraponto, os lodos têxtil e de ETA apresentaram concentrações relativamente estáveis e menores em todas as dosagens, evidenciando a menor disponibilidade desse metal nesses lodos (figura 13H). Houve bioacumulação em T, em todos os tratamentos de ETA e têxtil, e LG01.

A bioacumulação de alguns metais nas dosagens mais baixas tem relação com a natureza da fórmula matemática. Por ser uma fração, quanto maior a concentração do metal no solo (denominador) em relação às folhas (numerador), menor será o FBC e menos risco de bioacumular. Assim, para uma análise mais detalhada, sugere-se o estudo de outros parâmetros para complementar as observações.

5.5. Conclusões

Os resultados obtidos no experimento indicam que a utilização de alface como bioindicador é efetiva nesse tipo de estudo. Os lodos industriais para cultivo de plantas não consumidas cruas, como ornamentais ou florestais, pode ser uma prática viável, desde que controlada e com base em estudos detalhados sobre as concentrações de metais pesados.

Foi possível constatar que a influência da temperatura e umidade criou um ambiente desfavorável ao longo de todo o período. A aplicação dos lodos alterou a composição de parâmetros do solo, como o pH e condutividade elétrica. O lodo galvânico proporcionou um ambiente mais favorável no contexto deste estudo em específico. Por outro lado, nos lodos de ETA e têxtil as plantas não apresentaram diferenças significativas em relação a testemunha e tiveram o pior desenvolvimento.

Considerando os fatos mencionados, as políticas públicas e os regulamentos relacionados ao uso de lodo no solo para agricultura devem ser aprimorados. Dessa maneira, garantir que essa prática não apenas melhore a produtividade agrícola, mas também minimize os impactos ambientais e de saúde.

5.6. Referências

- ANTUNES, G. de S.; CARDOSO, I. da S.; LANDA, G. G. Avaliação do potencial agrônomo do lodo da estação de tratamento de efluente do município de Serra dos Aimorés – MG. **Acta biológica brasiliensia**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 47-58, 2021. Doi: <https://doi.org/10.18554/acbiobras.v4i2.7187>
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23^a ed. APHA: Washington, 2017.
- BITTENCOURT, R. F. P. de M.; SILVA JÚNIOR, M. L. da; SAMPAIO, I. M. G.; BITTENCOURT, E. C.; SANTOS, R. I. N.; COELHO, A. D.; FIGUEIREDO, S. P. R.; BITTENCOURT, I. C. F. de M.; LEMOS NETO, H. S. Morphophysiology and postharvest quality of hydroponic lettuce cultivars grown under high temperature. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 28, n. 5, p. e277774, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n5e277774>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009. p. 81-84. Disponível em: < https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=25954>. Acesso em: 13 jan. 2025.
- CECÍLIO FILHO, Arthur Bernardes; RODRIGUES, Marilsa Aparecida; SILVA, Maria Letícia Pacheco da; CORTEZ, Juan Waldir Mendoza. Sintomas de deficiência de macronutrientes em alface. **Científica**, Dracena, SP, v. 48, n. 3, p. 271-290, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n3p271-290>
- COMPESA - COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO. **Sistema Gurjaú**. Compesa, Recife/PE. 2016. Disponível em < <https://servicos.compesa.com.br/wp-content/uploads/2016/01/gurjau.pdf>> Acesso em 15 de dez. 2024.
- DASGAN, Hayriye Yildiz; YILMAZ, Dilek; ZIKARIA, Kamran; IKIZ, Boran; GRUDA, Nazim. Enhancing the yield, quality and antioxidant content of lettuce through innovative and eco-friendly biofertilizer practices in hydroponics. **Horticulturae**, [s.l.], v. 19, n. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121274>
- EMBRAPA CLIMA TEMPERADO. **Ciência ajuda a aproveitar lodo de tratamento de água na agricultura**. Disponível em: < https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/76090340/ciencia-ajuda-a-aproveitar-lodo-de-tratamento-de-agua-na-agricultura?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- FARSANG, A.; BABCSÁNYI, I.; LADÁNYI, Z.; PEREI, K.; BODOR, A.; CSÁNYI, K.T.; BARTA, K. Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on the microbial activity, the nutrient and heavy metal content of a chernozem soil in a field survey. **Arabian journal of geosciences** [s. l.], v. 13, p. 982, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06005-2>
- FERREIRA, N. de M.; SANTOS, L. C. dos; SILVA, M. L. P. da. Stakeholders e o gerenciamento de coprodutos: logística reversa e simbiose industrial na redução de custos.

Brazilian journal of development, v. 7, n. 3, p. 33182-33201. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-847>

KAPEL, N.; BOROS, I. F.; RAVELOMBOLA, F. S.; SIPOS, L.. EC sensitivity of hydroponically-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) types in terms of nitrate accumulation. **Agriculture**, [s.l.], v. 11, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11040315>.

KICINSKA, A.; POMYKATA, R.; IZQUEIRO-DIAZ, M. Changes in soil pH and Mobility of heavy metals in contaminated soils. **European journal of soil Science**, [s. l.], v. 73, n. 1, p. e13203, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>

KUDIRKA, G.; VIRSILÈ, A.; SUTULIENÈ, R.; LAUZIÈ, K.; SAMUOLIENÈ, G.. Precise management of hydroponic nutrient solution pH: the effects of minor pH changes and MÈS buffer molarity on lettuce physiological Properties. **Horticulturae**, [s.l.], v. 9, n. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070837>

KUME, W. T.; CAMPOS, L. M.; RIBEIRO, R; CAIONE, G. Desordens nutricionais provocadas por deficiência e excesso de zinco em plantas de milho. **Científica**, Dracena – SP, v. 49, n. 4, p. 165-173, 2022. Doi: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2021v49n4p165-173>.

LOURENÇO, G. A.; SILVA, M. P.; OLIVEIRA, C. A. Estudo da composição do lodo gerado no setor têxtil e suas implicações ambientais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 45-59, 2022

MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, [s.l.], v. 18, n. 5, p. 051701, 2022. Disponível em: [10.14808/sci.plena.2022.051701](https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.051701).

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. The Reuse of Water Treatment Sludge as a Coagulant for Post-Treatment of UASB Reactor Treating Urban Wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 272–281, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037>

NUNES, J. R.; CABRAL, F.; LÓPEZ-PIÑEIRO, A. Short-term effects on soil Properties and wheat production from secondary paper sludge application on two Mediterranean agricultural soils. **Bioresource technology**, [s. l.], v. 99, n. 11, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.016>

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, 2016. v.17, n.4, p.687-698. Disponível em: [https://doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4\(11\)](https://doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4(11))

OUBANE, M.; KHADRA, A.; EZZARIAI, A.; KOUISNI, L.; HAFIDI, M. Heavy metal accumulation and genotoxic effect of long-term wastewater irrigated peri-urban agricultural soils in semiarid climate. **Science of the total environment**, [s. l.], v. 794, n. 1, p. 148611, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148611>

PEDRINI, C. M.; KNOP, R. B. V. Extração e aplicação de coagulante vegetal à base de tanino para o tratamento de efluentes têxteis. **Revista da UNIFECE**, Brusque – SC, v. 1, n. 27, 2024.

PELISSARI, R. A. Z.; SAMPAIO, S. C.; GOMES, S. D.; CREPALLI, M. da S. Lodo têxtil e água residuária da suinocultura na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Engenharia**

agrícola, v. 29, n. 2, p. 288-300, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000200012>

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 478 p., 2002

RAMOS, R. M. B.; ALVES, E. V.; LIMA, A. de F. Avaliação do desenvolvimento de alface crespa cultivar vera: absorção de ferro e chumbo. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia – PB, v. 38, n. 4, p. 185-190, 2017.

RODRIGUES, L. G.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C. W.; BERNARDO, L. S.; SIMÕES, D. H. P.; GONÇALVES, A. H. M. Initial growth of hydroponics lettuce under different salinity levels in na automated system with Arduino as a function of air temperature and humidity in the semiarid. **Research, Society and development journal**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.25136>

SHAN, Y.; LV, M.; ZUO, W.; TANG, Z.; DING, C.; YU, Z.; SHEN, Z.; GU, C.; BAI, Y. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Scientific reports**, [s. l.], v. 11, p. 1402, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

SHETTY, R.; VIDYA, C. S.; PRAKASH, N. B.; LUX, A.; VACULÍK, M. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. **Science of the total environment**, [s. l.], v. 765, p. 142744, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>

SHI, X.; ZHANG, Xiaolei; CHEN, Guangcai; CHEN, Yitai; WANG, Ling; SHAN, Xiaoquan. Seed growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. **Journal Environment Science**, 23, p. 266 – 274, 2011.

SILVA, V. B. da. **Crescimento, biofortificação e qualidade de alface hidropônico em função de concentrações de ferro e zinco na solução nutritiva**. 2023. 48 f. Dissertação (Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias). Universidade Estadual Paulista, câmpus de Jaboticabal, 2023.

SOUZA, A. C. Z. **Uso sustentável do lodo de tratamento de água e esgoto: efeitos fitotóxicos, genotóxicos e possibilidade de uso antes e depois da biorremediação**. 2021. 167 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2021.

WALTER, S. H.; MINUZZI, R. B.; CONCEIÇÃO, A. G. Temperatura basal inferior e soma térmica de microverdes de beterraba, couve, rúcula, alface e salsa. **Brazilian journal of animal and environmental research**, Curitiba – PR, v. 7, n. 3, 2024, p. e72856. Doi: <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-078>

XU, T.; NAN, F.; JIANG, X.; TANG, Y.; ZENG, Y.; ZHANG, W.; SHI, B. Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium (III). **Ecotoxicology and environmental safety**, [s. l.], v. 195, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110459>

YUAN, X.; XUE, N.; HAN, Z. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years. **Journal of environmental sciences** [s. l.], v. 101, p. 17-226, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.08.013>

ZHANG, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Z.; LIU, C.; SUN, C.; ZHANG, W.; MARHABA, T. pH effect heavy metal release from a polluted sediment. **Journal of chemistry**, [s. l.], v. 2018, n. 1, p. 7597640, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/7597640>

ZHENG, X.; LIN, H.; DU, D.; LI, G.; ALAM, O.; CHENG, Z.; LIU, X.; JIANG, S.; LI, J. Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches. **Ecotoxicology and environmental safety**, [s. l.], v. 284, p. 116883, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116883>

6. CONCLUSÕES GERAIS

A partir das análises realizadas, foi possível constatar que a alface respondeu bem como bioindicador de toxidez. A adição de lodo industrial alterou algumas propriedades do solo. O lodo galvânico manteve o pH alcalino, enquanto o de ETA e têxtil manteve ácido. À medida que a dosagem de lodo aumentou, os sólidos fixos diminuíram e os voláteis aumentaram. A condutividade elétrica manteve-se baixa em todos os tratamentos.

Por meio das observações nos parâmetros da alface, constatou-se que as plantas no tratamento com lodo galvânico apresentaram maior número e comprimento de folhas, maior peso úmido e seco com diferença significativa de LG75 em comparação à testemunha. Contudo, nos lodos de ETA e têxtil as plantas não tiveram bom desenvolvimento, mesmo em comparação à testemunha. Em relação ao Fator de Bioacumulação (FBC), nos tratamentos com lodo de ETA e têxtil houve maior risco de bioacumulação. Com base nesse fator, as doses menos tóxicas foram de 5%, 1% e 50% para os lodos de ETA, têxtil e galvânico, respectivamente. As dosagens mais tóxicas foram de 25%, 5% e 1% para os lodos de ETA, têxtil e galvânico, respectivamente.

Portanto, embora o uso de lodo possa aumentar a fertilidade do solo e melhorar o crescimento das plantas, ele também pode introduzir níveis elevados de metais pesados que, quando absorvidos pela planta, podem comprometer a saúde ambiental e alimentar. Dessa forma, a determinação de doses seguras e monitoramento rigoroso das concentrações de metais pesados são cruciais para garantir a viabilidade dessa prática como alternativa sustentável para o manejo de resíduos industriais.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 10004. Resíduos Sólidos - Classificação. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, v. 2o Edição, p. 19, 2004

ANTUNES, G. de S.; CARDOSO, I. da S.; LANDA, G. G. Avaliação do potencial agrônômico do lodo da estação de tratamento de efluente do município de Serra dos Aimorés – MG. **Acta biológica brasiliensia**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 47-58, 2021. Doi: <https://doi.org/10.18554/acbiobras.v4i2.7187>

APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23^a ed. **APHA**: Washington, 2017.

ARAÚJO, V. dos S.; SILVA, M. O.; BRITO, A. S. de.; SOUSA, I. de L.; NUNES, F. C. et al. Sewage sludge and its agricultural potential. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. e14711326200, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26200>

AUSTRALIAN ACADEMY OF SCIENCE. **International scientific collaborations in a contested world**: Discussion paper. Disponível em: < <https://www.science.org.au/supporting-science/science-policy-and-analysis/reports-and-publications/international-scientific-collaborations-in-a-contested-world-discussion-paper>>. Acesso em: 06 set. 2024.

BALKRISHNA, A.; BANERJEE, S.; GHOSH, S.; CHAUHAN, D.; KAUSHIK, I.; ARYA, V. Reuse of sewage sludge as organic agricultural products: na eficiente technology-based initiative. **Applied and environmental soil Science**, [s. l.], v. 2024, n. 1, p. 1433973, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1155/2024/1433973>

BITENCOURT, Gislayne de Araujo; APOLARI, João Paulo; DE SOUZA, Gleison; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim. Lodo gerado em Estação de Tratamento de Água: Avaliação preliminar da toxicidade em plantas de milho. **Scientia Plena**, 16(12), 2020. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.120201>

BITTENCOURT, R. F. P. de M.; SILVA JÚNIOR, M. L. da; SAMPAIO, I. M. G.; BITTENCOURT, E. C.; SANTOS, R. I. N.; COELHO, A. D.; FIGUEIREDO, S. P. R.; BITTENCOURT, I. C. F. de M.; LEMOS NETO, H. S. Morphophysiology and postharvest quality of hydroponic lettuce cultivars grown under high temperature. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 28, n. 5, p. e277774, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n5e277774>

BORNMAN, L. Measuring impact in research evaluations: A thorough discussion of methods for, effects of, and problems with impact measurements. **Higher Education**, [s. l.], v. 73, n. 5, p. 775-787, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10734-016-9995-x>

BORNMAN, L.; DANIEL, H. D. What do citation counts measure? A review of studies on citing behavior. **Journal of Documentation**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 45-80, 2008.

BORNMAN, L.; HAUNSCHILD, R. The use of the journal impact factor in assessing research: Theoretical and empirical issues. **Springer Proceedings in Complexity**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 85-99, 2018.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). **Diário da União**. Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm >. Acesso: 21 de mar. de 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 498, de 21 de ago. de 2020. Dispõe de procedimentos para produção e aplicação de biossólidos em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Poder Executivo, Brasília, DF. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atonormativo&id=726>. Acesso em: 01 de fev. de 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 30 dez. 2009. p. 81-84. Disponível em: < https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=25954 >. Acesso em: 13 jan. 2025.

CARRARA, S. M. C. M. **Estudos de viabilidade do reúso de efluentes líquidos gerados em processos de galvanoplastia por tratamento físico-químico**. 1997. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CECÍLIO FILHO, Arthur Bernardes; RODRIGUES, Marilsa Aparecida; SILVA, Maria Letícia Pacheco da; CORTEZ, Juan Waldir Mendoza. Sintomas de deficiência de macronutrientes em alface. **Científica**, Dracena, SP, v. 48, n. 3, p. 271-290, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n3p271-290>

COMPESA - COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO. **Sistema Gurjaú**. Compesa, Recife/PE. 2016. Disponível em < <https://servicos.compesa.com.br/wp-content/uploads/2016/01/gurjau.pdf> > Acesso em 15 de dez. 2024.

COSTA, S.; VICENTE, M. G.; GOMES, V.; ARANA, A. R. A., ULIANA, M. Avaliação do potencial de bioacumulação de cromo em plantas de girassol. **Revista em agronegócio e meio ambiente**, Maringá – PR, v. 14, n. 2, p. 515-522, 2021.

CPRH - COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE. **Roteiro Complementar de Licenciamento e Fiscalização**: Tipologia Galvânica. Pernambuco: Projeto CPRH/GTZ, 2001.

CUNHA, Geremias Dourado da; STACHIW, Rosalvo & DE QUADROS, Kenia Michele. Lodo de estação de tratamento de água como componente para germinação de mudas florestais. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 11(1), 40-53, 2020. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0005>

DASGAN, Hayriye Yildiz; YILMAZ, Dilek; ZIKARIA, Kamran; IKIZ, Boran; GRUDA, Nazim. Enhancing the yield, quality and antioxidant content of lettuce through innovative and eco-friendly biofertilizer practices in hydroponics. **Horticulturae**, [s.l.], v. 19, n. 12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121274>

DONTHU, N.; KUMAR, S.; PATNAIK, D. Forty-five years of Journal of Business Research: A bibliometric analysis. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 109, p. 1-14, 2021.

EMBRAPA CLIMA TEMPERADO. **Ciência ajuda a aproveitar lodo de tratamento de água na agricultura**. Disponível em: < https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/76090340/ciencia-ajuda-a-aproveitar-lodo-de-tratamento-de-agua-na-agricultura?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 jan. 2025.

EU Commission. Horizon Europe: Promoting sustainability in industrial waste management. **European Union Reports**, 2023.

FARSANG, A.; BABCSÁNYI, I.; LADÁNYI, Z.; PEREI, K.; BODOR, A.; CSÁNYI, K.T.; BARTA, K. Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on the microbial activity, the nutrient and heavy metal content of a chernozem soil in a field survey. **Arabian journal of geosciences** [s. l.], v. 13, p. 982, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06005-2>

FERREIRA, N. de M.; SANTOS, L. C. dos; SILVA, M. L. P. da. Stakeholders e o gerenciamento de coprodutos: logística reversa e simbiose industrial na redução de custos. **Brazilian journal of development**, v. 7, n. 3, p. 33182-33201. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-847>

GARFIELD, E. The history and meaning of the journal impact factor. **JAMA**, v. 295, n. 1, p. 90-93, 2006.

GAVEL, Y.; ISILID, L. Web of Science and Scopus: a journal title overlap study. **Online Information Review**, v. 32, n. 1, p. 8-21, 2018.

HAUNSCHILD, R.; BORNMANN, L.; LEYDESDORFF, L. Networks of reader and author keywords in journal publications. **Journal of Informetrics**, v. 14, n. 3, p. 421-435, 2020.

HICKS, D.; WOUTERS, P.; WALTMAN, L.; DE RIJCKE, S.; RAFOLS, I. The Leiden Manifesto for research metrics. **Nature**, v. 520, n. 7548, p. 429-431, 2015.

KAPEL, N.; BOROS, I. F.; RAVELOMBOLA, F. S.; SIPOS, L. EC sensitivity of hydroponically-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) types in terms of nitrate accumulation. **Agriculture**, [s. l.], v. 11, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11040315>.

KICINSKA, A.; POMYKATA, R.; IZQUEIRO-DIAZ, M. Changes in soil pH and Mobility of heavy metals in contaminated soils. **European journal of soil Science**, [s. l.], v. 73, n. 1, p. e13203, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>

KUDIRKA, G.; VIRSILÈ, A.; SUTULIENÈ, R.; LAUZIÈ, K.; SAMUOLIENÈ, G. Precise management of hydroponic nutrient solution pH: the effects of minor pH changes and MÈS buffer molarity on lettuce physiological Properties. **Horticulturae**, [s.l.], v. 9, n. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070837>

KUMAR, S. Systematic Literature Review and Bibliometrics. **Journal of Business Research**, v. 104, p. 333-339, 2019.

KUME, W. T.; CAMPOS, L. M.; RIBEIRO, R.; CAIONE, G. Desordens nutricionais provocadas por deficiência e excesso de zinco em plantas de milho. **Científica**, Dracena – SP, v. 49, n. 4, p. 165-173, 2022. Doi: <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2021v49n4p165-173>.

LIEBL, Daiane; SCHOEN, Chaiane. Avaliação da toxicidade de lodos de estação de tratamento de água (ETA) e de estação de tratamento de esgoto (ETE) através de bioensaios com sementes de alface (*Lactuca sativa*) e cebola (*Allium cepa*). **Revista de Estudos Ambientais**, v. 23, n. 2, p. 64, 2022. DOI: 10.7867/1983-1501.2021v23n2p64-74. Disponível em: <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2021v23n2p64-74>. Acesso em: 20 de out. de 2023.

LIMA, A. et al. Circular economy and sludge reuse: Perspectives from Brazil. **Waste Management & Research**, 2022.

LOURENÇO, G. A.; SILVA, M. P.; OLIVEIRA, C. A. Estudo da composição do lodo gerado no setor têxtil e suas implicações ambientais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 45-59, 2022

MENEZES, Ana C. L. S. M. de; GADELHA, Carmem L. M.; SILVA JÚNIOR, Wamberto R. et al. Caracterização da água de lavagem de uma estação de tratamento de água, com vistas ao reúso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 191-196, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v9nsupp191-196>

MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G.; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 051701, 2022. Disponível em: [10.14808/sci.plena.2022.051701](https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.051701).

MOURA, L. S. de .; SILVA, C. L. .; REIS, A. C. dos S. .; MARINHO, E. P. .; NÓBREGA, A. C. V. da .; CARNEIRO, A. M. P. . . Characterization of the sludge produced in textile laundries in Agreste region of Pernambuco for use in alternative construction materials. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. e40910414078, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i4.14078. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14078>. Acesso em: 14 abr. 2024. Acesso em: 24 de jan. de 2024.

MUNAWAR, S. Industrial Sludge Management and Its Environmental Impacts. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 19, p. 24135-24154, 2021.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. The Reuse of Water Treatment Sludge as a Coagulant for Post-Treatment of UASB Reactor Treating Urban Wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 272–281, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037>

NUNES, J. R.; CABRAL, F.; LÓPEZ-PIÑEIRO, A. Short-term effects on soil Properties and wheat production from secondary paper sludge application on two Mediterranean agricultural soils. **Bioresource technology**, [s. l.], v. 99, n. 11, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.016>

OLIVEIRA, I. Y. Q.; RONDON, O. C. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **Interações** (Campo Grande), Campo Grande, 2016. v.17, n.4, p.687-698. Disponível em: [https://doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4\(11\)](https://doi.org/10.20435/1984-042X-2016-v.17-n.4(11))

ORTIZ-REMEDE, C.; BONILLA-COSTA, J.; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, L. Big data and bibliometrics: A computational approach to research trends in databases. **Scientometrics**, v. 120, n. 3, p. 1281-1301, 2019.

OUBANE, M.; KHADRA, A.; EZZARIAI, A.; KOUISNI, L.; HAFIDI, M. Heavy metal accumulation and genotoxic effect of long-term wastewater irrigated peri-urban agricultural soils

in semiarid climate. **Science of the total environment**, [s. l.], v. 794, n. 1, p. 148611, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148611>

PANDEY, B., et al. Advances in Metal Recovery from Electroplating Sludge: A Review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 423, p. 127562, 2022.

PEDRINI, C. M.; KNOP, R. B. V. Extração e aplicação de coagulante vegetal à base de tanino para o tratamento de efluentes têxteis. **Revista da UNIFEPE**, Brusque – SC, v. 1, n. 27, 2024.

PELISSARI, R. A. Z.; SAMPAIO, S. C.; GOMES, S. D.; CREPALLI, M. da S. Lodo têxtil e água residuária da suinocultura na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Engenharia agrícola**, v. 29, n. 2, p. 288-300, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000200012>

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Agropecuária**, 478 p., 2002

PRIEM, J. Altmetrics. **ASIS&T Annual Meeting**, v. 57, n. 1, p. 1-3, 2020.

RAMOS, R. M. B.; ALVES, E. V.; LIMA, A. de F. Avaliação do desenvolvimento de alface crespa cultivar vera: absorção de ferro e chumbo. **Revista Agropecuária Técnica**, Areia – PB, v. 38, n. 4, p. 185-190, 2017.

RASHEED, T.; HASSAN, A. A.; BILAL, M.; HUSSAIN, T.; RIZWAN, K. Metal-organic frameworks based adsorbents: A review from removal perspective of various environmental contaminants from wastewater. **ECSN**. [s. l.], p. 127369, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127369>>

ROCHA, G. C.; CRUSOÉ, J. M. S.; WOLLMANN, M. R. J.; SILVA, L. F. da. Alterações aos atributos químicos e mobilidade de íons em colunas de solo tratados com lodo de esgoto doméstico. **Observatório de lá economia latino-americana**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. e8667, 2025. Doi: <https://doi.org/10.55905/oelv23n1-129>

ROCHA, R. D. da; ZOREL JR., HE. E.; LANDO, T. Utilização de planejamento experimental no estudo para imobilização de lodo galvânico em cerâmica vermelha para minimização de impactos ambientais. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 1-10, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633651964>. Acesso em: 24 de jan. de 2024.

RODRIGUES, L. G.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C. W.; BERNARDO, L. S.; SIMÕES, D. H. P.; GONÇALVES, A. H. M. Initial growth of hydroponics lettuce under different salinity levels in na automated system with Arduino as a function of air temperature and humidity in the semiarid. **Research, Society and development journal**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.25136>

SANTOS, F. D dos; FANTINEL, R. A.; BROETTO WEILER, E.; CABRAL CRUZ, J. Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, p. 272-278, 5 jul. 2021. DOI: 17058/tecnolog.v25i2.15552. Disponível em: <<https://doi.org/10.17058/tecnolog.v25i2.15552>>. Acesso em: 01 de abr. de 2024

SANTOS, Gessica Zila Batista dos; MELO FILHO, João de Almeida; MANZATO, Lizandro. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos

rios Negro e Solimões. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 23, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0501>

SANTOS, J. da S.. **Avaliação da produtividade da alface irrigada sob cultivo protegido em resposta a aplicação de lodo de estação de tratamento de água**. 2021. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) –Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2021.

SANTOS, J. et al. Sustainable sludge reuse in Brazil: Challenges and opportunities. **Journal of Environmental Management**, 2023.

SANTOS, Luana Kelly de Jesus; PINTO, Caio de Oliveira; CAVALCANTI, Luiz Antônio Pimentel. Aplicações da lama de ETA visando à mitigação de impactos ambientais: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 21, p. 469-482, 2022. DOI: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2022\)092130](https://doi.org/10.21438/rbgas(2022)092130)

SHAN, Y.; LV, M.; ZUO, W.; TANG, Z.; DING, C.; YU, Z.; SHEN, Z.; GU, C.; BAI, Y. Sewage sludge application enhances soil properties and rice growth in a salt-affected mudflat soil. **Scientific reports**, [s. l.], v. 11, p. 1402, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80358-2>

SHETTY, R.; VIDYA, C. S.; PRAKASH, N. B.; LUX, A.; VACULÍK, M. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. **Science of the total environment**, [s. l.], v. 765, p. 142744, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>

SHI, X.; ZHANG, Xiaolei; CHEN, Guangcai; CHEN, Yitai; WANG, Ling; SHAN, Xiaoquan. Seed growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailings. *Journal Environment Science*, 23, p. 266 – 274, 2011.

SILVA, V. B. da. **Crescimento, biofortificação e qualidade de alface hidropônico em função de concentrações de ferro e zinco na solução nutritiva**. 2023. 48 f. Dissertação (Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias). Universidade Estadual Paulista, câmpus de Jaboticabal, 2023.

SOUZA, A. C. Z. **Uso sustentável do lodo de tratamento de água e esgoto: efeitos fitotóxicos, genotóxicos e possibilidade de uso antes e depois da biorremediação**. 2021. 167 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2021.

SOUZA, Paula Cristina de; PEREIRA, Nehemias Curvelo; GONÇALVES, Morgana Suszek; FILHO, Nelson Consolin et al. Estudo do tratamento de efluente têxtil através de processos de coagulação/floculação e eletrocoagulação. **e-Xacta**, v. 9, n. 2, p. 123-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18674/exacta.v9i2.1953>

SOUZA, R. et al. Circular economy and sludge reuse: Brazilian perspectives. **Environmental Science and Policy**, 2022.

SRIVASTAVA, R. R.; RAJAK, D. K.; ILYAS, S.; KIM, H.; PATHAK, P. Challenges, regulations, and case studies on sustainable management of industrial waste. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 51, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/min13010051>

TAVARES, R. G., SOBRINHO, M. A. D. M., PEREIRA, L., CÔRREA, M. M., ARRUDA, V. C. M. D.; MELO, R. R. C. D. (2019). Avaliação da toxicidade do lodo de estação de tratamento de água e esgoto, antes e após vermicompostagem, usando teste de germinação com semente de alface (*Lactuca sativa*). **Revista DAE**, v. 67, n. 218, p. 156-167, 2019. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/60925/1/document_51842_1.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

TEIXEIRA S. T.; MELO W. J.; SILVA E. T. Plant nutrients in a degraded soil treated with water treatment sludge and cultivated with grasses and leguminous plants. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 6, p. 1348-1354, 2007 . DOI: 10.1016/j.soilbio.2006.12.011.

UNESCO. **International scientific collaboration has become a must, says report**. Disponível em: <<https://www.unesco.org/en/articles/international-scientific-collaboration-has-become-must-says-report>>. Acesso em: 06 set. 2024.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Seed Germination / Root Elongation Toxicity Tests. **Ecological Effects**, Tests Guidelines, 1996.

VOSVIEWER. **VOSviewer** Manual. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/documentation>. Acesso em: 10 jul. 2024.

WALTER, S. H.; MINUZZI, R. B.; CONCEIÇÃO, A. G. Temperatura basal inferior e soma térmica de microverdes de beterraba, couve, rúcula, alface e salsa. **Brazilian journal of animal and environmental research**, Curitiba – PR, v. 7, n. 3, 2024, p. e72856. Doi: <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-078>

WOUTERS, P.; RUSHFORTH, A. Quality indicators and research integrity. In: Handbook of Research Integrity. 2. ed. **Springer**, 2018. p. 465-479.

XIAO, J. SHEN, J.; BAI, M.; GAO, Q.; WU, Y. Reuse of construction spoil in China: current status and future opportunities. **Journal of cleaner production**, [s. l.], v. 290, n. 1, p. 125742, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125742>

XU, T.; NAN, F.; JIANG, X.; TANG, Y.; ZENG, Y.; ZHANG, W.; SHI, B. Effect of soil pH on the transport, fractionation, and oxidation of chromium (III). **Ecotoxicology and environmental safety**, [s. l.], v. 195, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110459>

YASEEN, D.A., SCHOLZ, Miklas. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 16, 1193–1226 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>

YASEEN, D.A., SCHOLZ, Miklas. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 16, 1193–1226 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>

YUAN, X.; XUE, N.; HAN, Z. A meta-analysis of heavy metals pollution in farmland and urban soils in China over the past 20 years. **Journal of environmental sciences** [s. l.], v. 101, p. 17-226, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.08.013>

ZHANG, W., et al. Application of Water Treatment Sludge in Agriculture: A Review. **Waste Management**, v. 124, p. 245-256, 2023.

ZHANG, Y. et al. International collaboration in waste management research: A bibliometric analysis. **Waste Management & Research**, 2023.

ZHANG, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, Z.; LIU, C.; SUN, C.; ZHANG, W.; MARHABA, T. pH effect heavy metal release from a polluted sediment. **Journal of chemistry**, [s. l.], v. 2018, n. 1, p. 7597640, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/7597640>

ZHENG, X.; LIN, H.; DU, D.; LI, G.; ALAM, O.; CHENG, Z.; LIU, X.; JIANG, S.; LI, J. Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches. **Ecotoxicology and environmental safety**, [s. l.], v. 284, p. 116883, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116883>

ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.