

# O papel dos fungos no tratamento de lixiviado de aterro sanitário

*The role of fungi in the treatment of landfill leachate*

Maria Eduarda Aranega Pesenti<sup>1\*</sup> , Kátia Valéria Marques Cardoso Prates<sup>2</sup> 

## RESUMO

O lixiviado de aterro sanitário é um efluente gerado durante a decomposição de resíduos sólidos urbanos, contendo contaminantes como metais tóxicos e compostos orgânicos, que são difíceis de tratar. Diante da necessidade de investigar métodos mais eficazes, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação da micorremediação no tratamento do lixiviado, utilizando três métodos de análise: InOrdinatio, bibliométrica e de conteúdo. A busca por publicações foi feita no Google Acadêmico e na Elsevier, com *strings* de busca como "landfill leachate" e "mycoremediation". Inicialmente, 697 publicações foram identificadas, das quais 278 foram filtradas, resultando em 23 artigos mais relevantes. A análise bibliométrica destacou 2020 como o ano mais produtivo. A análise de conteúdo das 10 publicações mais relevantes revelou uma diversidade de metodologias, incluindo diferentes inóculos e biorreatores. Fungos como *Aspergillus flavus* e *Bjerkandera adusta* se destacaram na remoção de poluentes. Apesar das vantagens, como baixo custo e eficiência, desafios como a sensibilidade a altas concentrações de lixiviado e a falta de padronização ainda precisam ser abordados, assim como a realização de estudos em condições reais de campo para validar os resultados obtidos em laboratório.

**Palavras-chave:** análise InOrdinatio; micorremediação; revisão sistemática da literatura; métodos de tratamento.

## ABSTRACT

Landfill leachate is an effluent generated during the decomposition of urban solid waste, containing contaminants such as toxic metals and organic compounds that are difficult to treat. Given the need to investigate more effective methods, this study aimed to conduct a systematic literature review on the application of mycoremediation in leachate treatment, using three analysis methods: InOrdinatio, bibliometric, and content analysis. The search for publications was conducted on Google Scholar and Elsevier, using search strings like "landfill leachate" and "mycoremediation." Initially, 697 publications were identified, of which 278 were filtered, resulting in 23 of the most relevant articles. The bibliometric analysis highlighted 2020 as the most productive year. The content analysis of the ten most relevant publications revealed a diversity of methodologies, which included different inocula and bioreactors. Fungi such as *Aspergillus flavus* and *Bjerkandera adusta* were prominent in pollutant removal. Despite advantages like low cost and efficiency, challenges such as sensitivity to high concentrations of leachate and the lack of standardization still need to be addressed, as well as conducting studies under real field conditions to validate laboratory results.

**Keywords:** InOrdinatio analysis; mycoremediation; systematic literature review; treatment methods.

## INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) enfrenta desafios, especialmente pela rápida obsolescência de produtos, que resulta em grandes volumes de resíduos descartados. A gestão eficaz dos RSU é essencial para proteger a saúde pública, preservar a qualidade ambiental e promover a sustentabilidade. No Brasil, o aterro sanitário destaca-se como

o principal método de disposição final ambientalmente adequado, sendo uma estrutura projetada para controlar e minimizar os impactos ambientais dos resíduos e de seus efluentes, como líquidos e gases (SNIS, 2021). Durante o processo de decomposição dos resíduos, um dos principais produtos gerados é o lixiviado, que pode representar riscos adicionais ao meio ambiente se não for adequadamente tratado.

<sup>1</sup>Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Londrina (PR), Brasil.

<sup>2</sup>Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos. Professora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Londrina (PR), Brasil.

\*Endereço para correspondência: Avenida dos Pioneiros, 3131, Jardim Marumbi, CEP: 86036-370, Londrina (PR), Brasil. e-mail: aranegapesenti@gmail.com

Esse lixiviado apresenta uma carga poluente considerável, composta de matéria orgânica dissolvida, macrocomponentes inorgânicos, metais tóxicos e compostos orgânicos xenobióticos (ZEGZOUTI *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2024). Caracterizado por sua coloração escura e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o lixiviado contém substâncias complexas que variam conforme a composição dos resíduos e as condições do aterro.

O tratamento do lixiviado envolve a utilização de métodos químicos que muitas vezes podem ser incompletos e até agravar a toxicidade, além de métodos tradicionais de tratamento biológico que enfrentam dificuldades em razão da baixa biodegradabilidade e das altas concentrações de compostos inibidores. Nesse cenário, a biorremediação, que utiliza microrganismos, tem se destacado como uma alternativa eficaz, especialmente por meio da micorremediação, em que os fungos são utilizados por causa de sua capacidade oxidativa e de produzir enzimas. Esses organismos demonstram grande potencial para transformar compostos fenólicos e/ou aromáticos recalcitrantes em matrizes ambientais, reduzindo a toxicidade do efluente (ISLAM; YUAN, 2020; SIRACUSA *et al.*, 2020; KAO, 2023; YE *et al.*, 2024). Além disso, a micorremediação oferece a vantagem de degradar mais facilmente poluentes orgânicos de alta massa molecular e proporcionar maior taxa de redução de demanda química de oxigênio (DQO) e DBO (BARDI *et al.*, 2017).

A revisão sistemática da literatura é uma ferramenta que permite identificar, organizar e selecionar trabalhos pertinentes para dada pesquisa. Segundo Okoli e Duarte (2015), a revisão sistemática é “um método sistemático, explícito, abrangente e reprodutível” que visa identificar, avaliar e sintetizar o conjunto existente de publicações acadêmicas. Essa abordagem fornece um portfólio de publicações a serem analisadas. Entre os métodos de análise, destacam-se a análise InOrdinatio (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015; PAGANI *et al.*, 2022), que apresenta critérios de relevância acadêmica para selecionar as publicações a serem analisadas; a análise bibliométrica, que utiliza técnicas quantitativas e estatísticas para mensurar a produção e a difusão do conhecimento, permitindo entender a situação da pesquisa em determinada área e avaliar seu

impacto (ARAÚJO, 2006; STEFANUTO, 2022); e a análise de conteúdo, que envolve uma leitura cuidadosa do material, permitindo a classificação do conteúdo segundo critérios específicos (BARDIN, 1977).

Diante da necessidade de investigar métodos mais eficazes para o tratamento do lixiviado gerado em aterros sanitários de RSU, este estudo teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação da micorremediação no tratamento desse efluente.

## METODOLOGIA

Para realizar o mapeamento das publicações relacionadas à utilização de fungos no tratamento do lixiviado de aterros sanitários urbanos, foram seguidas as etapas: definição da intenção da pesquisa e das bases de dados, definição das *strings* de busca e delimitação temporal. Com o portfólio de publicações levantado, foram aplicados os seguintes métodos de análise: InOrdinatio, bibliométrico e de conteúdo.

A intenção da pesquisa foi definida por meio de uma pergunta norteadora: como os fungos são empregados no tratamento do lixiviado oriundo de aterros sanitários? Com base nessa indagação principal, desdobraram-se duas questões secundárias:

- quais são as vantagens e desvantagens vinculadas aos tratamentos implementados?;
- qual é a viabilidade do tratamento utilizando fungos?

Com a intenção de pesquisa definida, foi feita a escolha das bases de dados a serem consultadas. Duas bases de dados foram selecionadas: Google Acadêmico e a plataforma da editora Elsevier, com foco na busca de publicações que contivessem dados experimentais. Em seguida, realizou-se uma pesquisa preliminar nas bases escolhidas, visando compreender os termos a serem utilizados na pesquisa.

A próxima etapa consistiu na seleção das *strings* de busca, empregando a lógica booleana com os operadores “AND” e “OR” entre as *strings*, resultando na identificação de publicações que incluem simultaneamente os termos de pesquisa. As *strings* selecionadas foram: “land-fill leachate”, “micoremediation”, “fungal biodegradation”

“fungus”, “toxicity” e “treatment”, além de seus equivalentes em português: “lixiviado de aterro sanitário”, “micorremediação”, “biodegradação fúngicas”, “fungo”, “toxicidade” e “tratamento”. A delimitação temporal foi de 2014 a 2023, totalizando 10 anos, com o intuito de selecionar trabalhos mais recentes.

Após a definição das *strings* de busca, iniciou-se a pesquisa nas bases de dados. No Google Acadêmico, foi necessário adicionar o operador “NOT” seguido de “review” para excluir artigos de revisão. Na plataforma da Elsevier, a exclusão de artigos de revisão é feita diretamente, pois existe a opção de pesquisar apenas publicações com dados experimentais.

Com a pesquisa concluída nas bases de dados, as publicações foram exportadas para o Mendeley Reference Manager (2.102.0) e o JabRef (5.10), para a primeira etapa de filtragem. Nessa etapa, foram descartadas publicações duplicadas, artigos de revisão, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses, além de artigos que não continham os dados básicos (ano, autor, revista e título). Após essa primeira filtragem, as publicações restantes foram exportadas para o Excel, em que foram verificadas as informações do título, palavras-chave e resumo, permitindo a exclusão de trabalhos que não estavam alinhados com o tema (segunda etapa de filtragem), obtendo-se o portfólio bruto.

Com o portfólio bruto, iniciou-se a análise InOrdinatio tendo como base três critérios de ranqueamento das publicações: fator de impacto, ano de publicação e número de citações. Cada critério recebe uma pontuação de 0 a 10, conforme sua importância para a pesquisa — 10 é considerado extremamente importante, e 0, nada importante. Neste estudo, todos os critérios receberam 10 pontos. Em seguida, utilizou-se a planilha RankIn, disponibilizada por Pagani *et al.* (2022), para coletar os valores dos critérios de cada artigo selecionado, e o cálculo do InOrdinatio foi realizado conforme a Equação 1:

$$\text{InOrdinatio} = \{(\text{IF} * \Delta) + (\text{PY} * \lambda) + (\text{Ci} * \Omega)\} \quad (1)$$

Em que:

$\Delta$ ,  $\lambda$  e  $\Omega$  = valor de 0 a 10 atribuído à pesquisa;

IF = pontuação do fator de impacto;

PY = pontuação do ano de publicação;

Ci = pontuação do número de citações.

As publicações foram classificadas de acordo com seus valores de InOrdinatio; aquelas com pontuação mais alta foram consideradas mais relevantes para a pesquisa. Neste trabalho, foram selecionados para o portfólio final os artigos que atingiram pontuação maior ou igual a 100 pontos.

Além dessa abordagem, foram incluídos no portfólio final artigos que, mesmo com pontuação inferior ou sem atender ao critério mínimo de 100 pontos, respondiam diretamente à pergunta norteadora da pesquisa. Essa segunda etapa de seleção não considerou o número de citações, uma vez que o foco era garantir que estudos altamente relevantes para o tema, mas possivelmente recentes e/ou menos citados, não fossem excluídos. Essa abordagem híbrida permitiu equilibrar o peso histórico dos artigos, representado pelo número de citações, com a necessidade de incluir contribuições específicas e diretas ao tema em questão. Na Figura 1 está ilustrada toda a metodologia realizada para a seleção das publicações.

A análise bibliométrica foi realizada com as publicações selecionadas para compor o portfólio final. Para essa análise, utilizaram-se as informações referentes a:

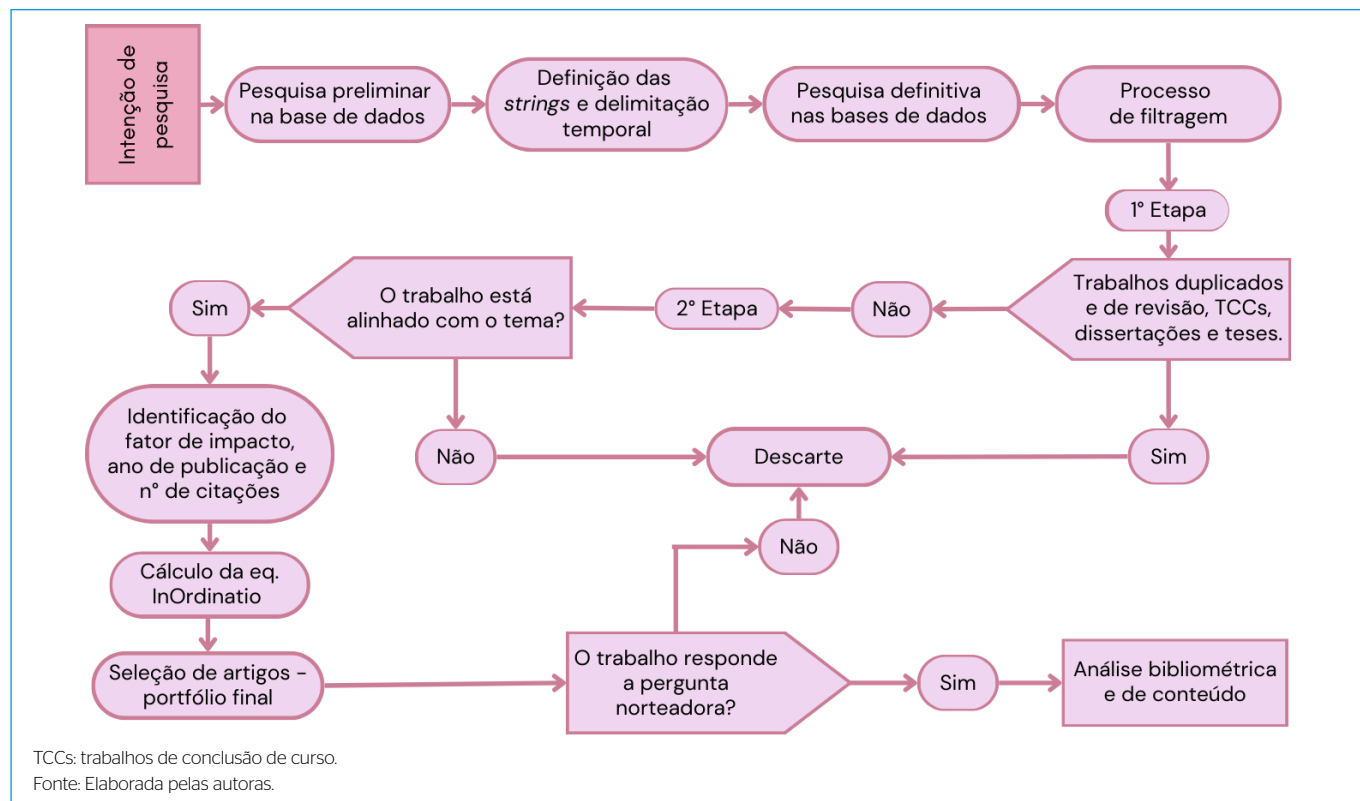
- ano de ocorrência;
- veículo de publicação;
- rede de interação dos autores;
- ocorrência de palavras-chave.

As informações foram tratadas utilizando os *softwares* Microsoft Excel e VOSviewer.

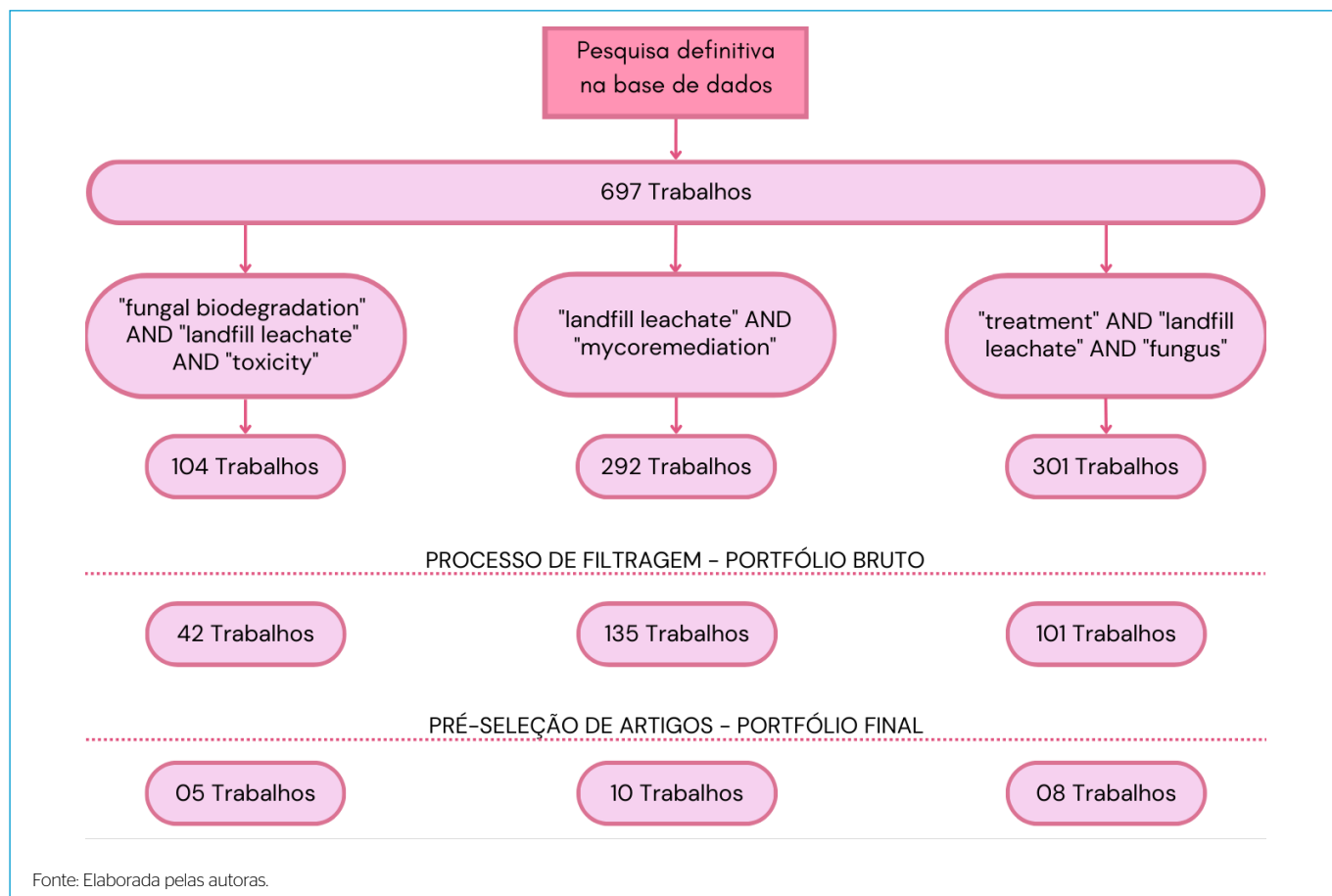
Para a análise de conteúdo, foi realizado um refinamento das publicações pertencentes ao portfólio final. Assim, 10 publicações foram selecionadas com base no valor do InOrdinatio e na pertinência para responder às perguntas norteadoras.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados referentes ao número de publicações selecionadas após as etapas de filtragem e aplicação da análise InOrdinatio. Por meio da



**Figura 1** – Fluxograma das etapas para a seleção dos artigos



**Figura 2** – Número de publicações do portfólio bruto e final após filtragem e análise InOrdinatio

pesquisa realizada com as *strings* de busca, foram identificadas 697 publicações. Após a etapa de filtragem, 419 publicações foram excluídas, resultando em um portfólio bruto de 278 publicações. Em seguida, foi realizada

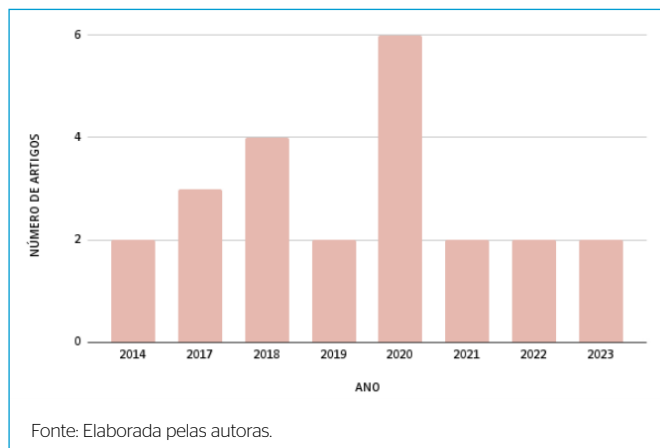
a análise InOrdinatio, que reduziu esse número para 22 publicações relacionadas à pesquisa experimental, compondo assim o portfólio final. No Quadro 1 os trabalhos selecionados para integrar o portfólio final são expostos.

**Quadro 1 – Artigos selecionados para compor o portfólio final**

Ano	Revista	Autoria	Título
2023	<i>Holos</i>	Pesenti <i>et al.</i>	"Evaluation of the bioremediation potential of <i>Candida spp.</i> and <i>Trichophyton spp.</i> fungi in the treatment of leachate from a landfill"
2023	<i>International Journal of Phytoremediation</i>	Nazir <i>et al.</i>	"Synergistic impact of two autochthonous saprobic fungi ( <i>A. niger</i> and <i>T. pseudokoningii</i> ) on the growth, ionic contents, and metals uptake in <i>Brassica juncea</i> L. and <i>Vigna radiata</i> L. under tannery solid waste contaminated soil"
2022	<i>Journal of Applied Sciences and Environmental Management</i>	Ikechi-Nwogu e Akpan	"Mycoremediation potential of edible mushroom ( <i>Lentinus squarrosulus</i> Mont) for reduction of physicochemical properties and microbial load of landfill leachate obtained from Choba Dumpsite, Rivers State, Nigeria"
2022	<i>Heliyon</i>	El-Bondkly e El-Gendy	"Bioremoval of some heavy metals from aqueous solutions by two different indigenous fungi <i>Aspergillus sp.</i> AHM69 and <i>Penicillium sp.</i> AHM96 isolated from petroleum refining wastewater"
2022	<i>Environmental Science and Pollution Research International</i>	Zanganeh <i>et al.</i>	"Bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane ( <i>Portulaca oleracea</i> L.)"
2021	Woodhead Publishing	Koul, Ahmad e Singh	"Mycoremediation: A novel approach for sustainable development"
2020	<i>Journal of Environmental Management</i>	Zegzouti <i>et al.</i>	"Bioremediation of landfill leachate by <i>Aspergillus flavus</i> in submerged culture: Evaluation of the process efficiency by physicochemical methods and 3D fluorescence spectroscopy"
2020	<i>Water</i>	Siracusa <i>et al.</i>	"Mycoremediation of old and intermediate landfill leachates with an ascomycete fungal isolate, <i>Lambertella sp.</i> "
2020	<i>Fungal Biology Reviews</i>	Ahmed, Figueroa e Pajot	"Dual purpose of lignolytic- basidiomycetes: mycoremediation of bioethanol distillation vinasse coupled to sustainable bio-based compounds production"
2020	<i>Biochemical Engineering Journal</i>	Hassan <i>et al.</i>	"Bioaugmentation assisted mycoremediation of heavy metal and/metalloid landfill contaminated soil using consortia of filamentous fungi"
2020	<i>Biodegradation</i>	Islam e Yuan	"Fungal treatment of mature landfill leachate utilizing woodchips and wheat-straw as co-substrates"
2019	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	Tigini <i>et al.</i>	"Wastewater-Agar as a selection environment: A first step towards a fungal in-situ bioaugmentation strategy"
2019	<i>Chemosphere</i>	Wang <i>et al.</i>	"Removal and tolerance mechanism of Pb by a filamentous fungus: A case study"
2018	<i>Life</i>	Spina <i>et al.</i>	"Bioremediation of landfill leachate with fungi: Autochthonous vs. Allochthonous Strains"
2018	<i>Chemosphere</i>	Albert <i>et al.</i>	"Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus <i>Absidia cylindrospora</i> "
2018	<i>Journal of Environmental Management</i>	Kumar <i>et al.</i>	"Wastewater cleanup using <i>Phlebia acerina</i> fungi: An insight into mycoremediation"
2019	<i>Environmental Engineering Research</i>	Smaoui <i>et al.</i>	"A new approach for detoxification of landfill leachate using <i>Trametes trogii</i> "
2017	<i>Water</i>	Bardi <i>et al.</i>	"Recalcitrant compounds removal in raw leachate and synthetic effluents using the white-rot fungus <i>Bjerkandera adusta</i> "
2017	<i>International Journal of Environmental Science and Technology</i>	Awasthi, Pandey e Khan	"Potential of fungus <i>Trichoderma harzianum</i> for toxicity reduction in municipal solid waste leachate"
2017	<i>Chemosphere</i>	Mohammadian <i>et al.</i>	"Tolerance to heavy metals in filamentous fungi isolated from contaminated mining soils in the Zanjan Province, Iran"
2014	<i>Waste Management</i>	Kalciková <i>et al.</i>	"Fungal and enzymatic treatment of mature municipal landfill leachate"
2014	<i>Science of the Total Environment</i>	Tigini, Prigione e Varese	"Mycological and ecotoxicological characterisation of landfill leachate before and after traditional treatments"

### Análise bibliométrica

A análise da distribuição temporal das publicações do portfólio final está exposta na Figura 3. Considerando os 10 anos analisados na revisão (2014 a 2023), o ano de 2020

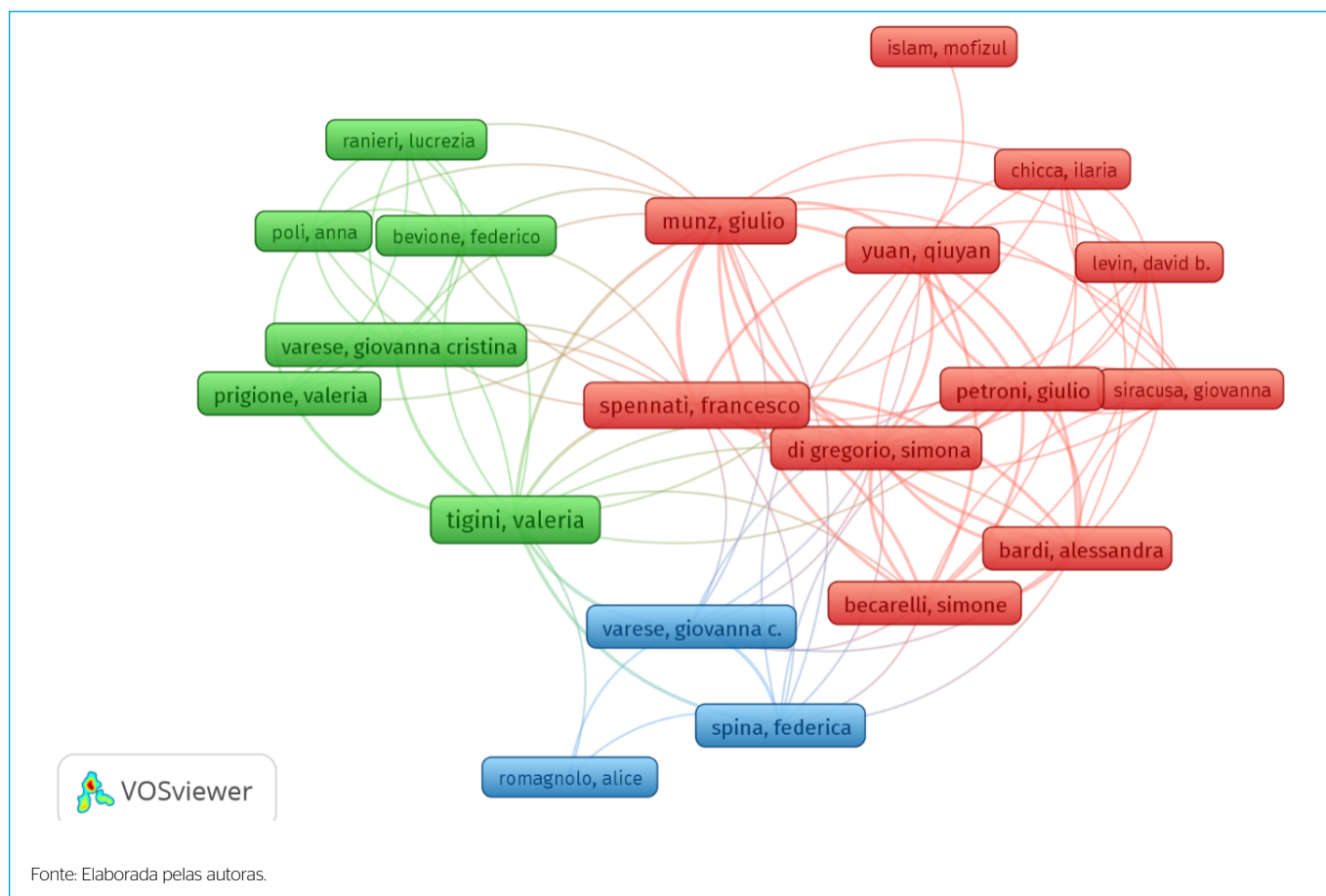


**Figura 3 - Análise temporal dos artigos selecionados para o portfólio final**

se destaca como o período com o maior número de artigos publicados, representando 26% do total. De 2014 em diante, observa-se o aumento no número de publicações, com exceção de 2019, até 2020. Após esse período, o número de publicações se estabilizou em 8,7%. A análise das revistas que publicaram esses trabalhos revela que *Chemosphere* é o periódico com o maior número de publicações, totalizando 17,4%, seguido por *Journal of Environmental Management* e *Water*, ambos com 8,7% de publicação.

Com o *software* VOSviewer, mapearam-se as redes de coautoria (Figura 4), identificando-se três *clusters* distintos de interação entre os pesquisadores.

Os autores V. Tigini e G. Munz são os responsáveis por interligar os três grupos de pesquisadores. V. Tigini faz parte do Departamento de Ciências da Vida e Biologia de Sistemas da Universidade de Turim, Itália, e G. Munz, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Florença, Itália.



**Figura 4 - Rede de autores identificados nas publicações**



## Análise de conteúdo

Após a análise bibliométrica, foram selecionadas as 10 publicações mais relevantes para a extração de dados. As publicações escolhidas são dos autores: Kalcíková *et al.* (2014); Awasthi, Pandey e Khan (2017); Bardi *et al.* (2017); Spina *et al.* (2018); Smaoui *et al.* (2019); Islam e Yuan (2020); Siracusa *et al.* (2020); Zegzouti *et al.* (2020); Ikechi-Nwogu e Akpan (2022); e Pesenti *et al.* (2023). Esses pesquisadores exploram diferentes aspectos da micorremediação, desde a identificação de fungos específicos até o desenvolvimento de metodologias de tratamento.

A análise de conteúdo das publicações selecionadas permitiu identificar o contexto atual da micorremediação no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Atualmente, a pesquisa está focada em três principais eixos:

- a remoção de matéria orgânica e compostos tóxicos;
- a redução da toxicidade;
- a descoloração do efluente.

Todavia, ainda há lacunas, como a falta de padronização metodológica e a escassez de estudos em escala real, que limitam a aplicação prática dessas técnicas.

Na Figura 5 é apresentada a relação entre os fungos estudados e suas ações no tratamento do lixiviado. Pode-se verificar uma diversidade de métodos empregados pelos diferentes autores em suas pesquisas. O uso de inóculos esporais, como demonstrado por Zegzouti *et al.* (2020), se por sua adaptabilidade às condições ambientais variáveis dos lixiviados, uma vez que esses inóculos podem se ajustar melhor a essas condições. Em contrapartida, o inóculo micelial, utilizado por Kalcíková *et al.* (2014), Smaoui *et al.* (2019) e Pesenti *et al.* (2023), pode proporcionar uma colonização mais rápida e eficiente, uma vez que o micélio já se encontra em estágio avançado de desenvolvimento.

O uso de biorreatores, conforme evidenciado por Siracusa *et al.* (2020), demonstra tendência crescente em direção a sistemas mais controlados e otimizados, permitindo o monitoramento e ajuste das condições operacionais para maximizar a eficiência da degradação. Além disso, a combinação de cossustratos com o tratamento fúngico, explorada por Islam e Yuan (2020), pode aumentar a biodisponibilidade dos contaminantes, facilitando

sua degradação, no entanto há a preocupação com a carga tóxica remanescente nos substratos pós-tratamento, uma vez que essa técnica pode gerar resíduos mais volumosos em comparação com outras metodologias.

Os métodos de avaliação da eficácia do tratamento incluíram análises experimentais em escala de laboratório incluindo cultivo submerso e análises físico-químicas. De qualquer modo, a realização de estudos em condições reais de campo é importante para validar os resultados obtidos em laboratório e em biorreatores.

Entre os fungos estudados, *Aspergillus flavus* destacou-se na remoção de DBO, DQO e amônia, alcançando resultados de 81,63, 48,50 e 98,81%, respectivamente, no tratamento de lixiviados jovens. O fungo *Bjerkandera adusta* demonstrou eficácia na remoção de DBO do lixiviado bruto (BARDI *et al.*, 2017; ZEGZOUTI *et al.*, 2020). A levedura *Candida spp.* apresentou bons resultados na redução da toxicidade de lixiviados (PESENTI *et al.*, 2023), enquanto o tratamento com os fungos autóctones *Pseudallescheria boydii* e *Phanerochaete sanguinea* resultou em rápida descoloração (60%) do efluente (SPINA *et al.*, 2018).

A presença crescente de compostos refratários em lixiviados de aterros mais antigos, conforme observado por Zegzouti *et al.* (2020), destaca a complexidade do tratamento de lixiviados em diferentes estágios de decomposição. A degradação desses compostos refratários representa um desafio, pois estes tendem a ser mais resistentes a processos biológicos e químicos. Isso indica que as estratégias de micorremediação devem ser adaptadas conforme a idade do aterro e as características específicas do lixiviado.

A análise das publicações revelou que, embora a micorremediação seja promissora, é recomendável evitar alguns caminhos para garantir a eficiência do tratamento. Entre eles, ressaltam-se:

- o uso exclusivo de inóculos miceliais sem adaptação prévia, por causa da sua sensibilidade a variações nas condições do lixiviado;
- a aplicação do tratamento sem pré-caracterização do efluente, o que pode levar a resultados inconsistentes;
- a dependência excessiva de cossustratos, que pode aumentar a geração de resíduos e a complexidade do processo.



**Figura 5 - Relação entre os fungos utilizados nas pesquisas e suas ações no tratamento do lixiviado**



Em contrapartida, caminhos recomendados incluem:

- o bioaumento em sistemas existentes, com a introdução de fungos como *Aspergillus flavus* e *Bjerkandera adusta* para melhorar a remoção de poluentes;
- a utilização da micorremediação como etapa isolada para lixiviados com alta concentração de compostos refratários;
- a adoção de biorreatores, que permitem maior controle e otimização do processo, conforme demonstrado por Siracusa *et al.* (2020).

Embora os resultados até o momento sejam promissores, o tratamento de lixiviados com fungos ainda requer estudos adicionais para alcançar uma padronização eficiente. As publicações destacam a importância da micorremediação como uma estratégia viável e sustentável, mas também apontam para a necessidade de pesquisas futuras que validem essas abordagens em condições reais. A combinação de diferentes métodos e fungos, bem como a consideração das variáveis ambientais, será fundamental para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e adaptáveis.

## CONCLUSÃO

Em síntese, a revisão sistemática da literatura proporcionou uma compreensão abrangente do uso de fungos no tratamento de lixiviados de aterros sanitários. A análise bibliométrica destacou 2020 como o ano mais produtivo, enquanto a análise de conteúdo revelou a diversidade de metodologias e a complexidade das abordagens. A escolha de inóculos, biorreatores e cossubstratos reflete a busca por soluções eficazes diante dos desafios do efluente. Fungos

como *Aspergillus flavus* e *Bjerkandera adusta* demonstraram capacidade diferenciada na degradação de poluentes específicos.

Entre as vantagens dos métodos de tratamento descritos nas publicações analisadas, salientam-se o baixo custo em comparação com abordagens físico-químicas, a eficiência na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, assim como de compostos de difícil degradabilidade, e a produção reduzida de resíduos. Em contrapartida, as principais desvantagens incluem a sensibilidade dos fungos a altas concentrações de lixiviado, a duração mais prolongada do tratamento e a escassez de estudos sobre o tema. Apesar dessas limitações, o uso de fungos para tratar lixiviados de aterros sanitários tem se mostrado uma técnica viável e eficaz.

Para avançar nessa área, é recomendável priorizar o uso de biorreatores, que permitem maior controle e otimização do processo, e explorar o bioaumento em sistemas existentes, integrando fungos a tratamentos biológicos convencionais. Além disso, estudos em escala real são essenciais para validar os resultados laboratoriais e ajustar as metodologias às condições práticas. A combinação de diferentes métodos e fungos, aliada à consideração das variáveis ambientais, será crucial para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e adaptáveis. Em última análise, embora os avanços sejam evidentes, a padronização do tratamento de lixiviado com fungos ainda requer aprofundamento. A compreensão das interações entre os diferentes métodos e a seleção cuidadosa de fungos promissores são passos importantes para a implementação de práticas sustentáveis e eficientes no tratamento de efluentes.

## REFERÊNCIAS

AHMED, P.M.; FIGUEROA, L.I.C.; PAJOT, H.F. Dual purpose of ligninolytic basidiomycetes: mycoremediation of bioethanol distillation vinasse coupled to sustainable bio-based compounds production. *Fungal Biology Reviews*, v. 34, n. 1, p. 25-40, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2019.12.001>

ALBERT, Q.; LELEYTER, L.; LEMOINE, M.; HEUTTE, N.; RIOULT, J.; SAGE, L.; BARAUD, F.; GARON, D. Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus *Absidia cylindrospora*. *Chemosphere*, v. 196, p. 386-392, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.156>

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em Questão*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/16>. Acesso em: 1º abr. 2025.

AWASTHI, A.K.; PANDEY, A.K.; KHAN, J. Potential of fungus *Trichoderma harzianum* for toxicity reduction in municipal solid waste leachate. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 14, p. 2015-2022, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1271-9>

BARDI, A.; YUAN, Q.; TIGINI, V.; SPINA, F.; VARESE, G.C.; SPENNATI, F.; BECARELLI, S.; GREGORIO, S.; PETRON, G.; MUNZ, G. Recalcitrant compounds removal in raw leachate and synthetic effluents using the white-rot fungus *Bjerkandera adusta*. *Water*, v. 9, n. 11, p. 824, 2017. <https://doi.org/10.3390/w9110824>

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70, 1977.

EL-BONDKLY, A.; EL-GENDY, M. Bioremoval of some heavy metals from aqueous solutions by two different indigenous fungi *Aspergillus* sp. AHM69 and *Penicillium* sp. AHM96 isolated from petroleum refining wastewater. *Heliyon*, v. 8, n. 7, e09854, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09854>

HASSAN, A.; PARIATAMBY, A.; OSSAI, I.C.; HAMID, F.S. Bioaugmentation assisted mycoremediation of heavy metal and metalloids landfill contaminated soil using consortia of filamentous fungi. *Biochemical Engineering Journal*, v. 157, 107550, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107550>

IKECHI-NWOGU, G.; AKPAN, D. Mycoremediation potential of edible mushroom (*Lentinus squarrosulus* Mont) for reduction of physicochemical properties and microbial load of landfill leachate obtained from Choba Dumpsite, Rivers State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 26, n. 12, p. 2101-2106, 2022. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i12.26>

ISLAM, M.; YUAN, Q. Fungal treatment of mature landfill leachate utilizing woodchips and wheat-straw as co-substrates. *Biodegradation*, v. 31, n. 1-2, p. 109-122, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10532-020-09897-9>

KALČÍKOVÁ, G.; BABIČ, J.; PAVKO, A.; GOTVAJN, A.Z. Fungal and enzymatic treatment of mature municipal landfill leachate. *Waste Management*, v. 34, n. 4, p. 798-803, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.017>

KAO, L.S. *Estudo de métodos para avaliação da degradação de bisfenol A (BFA) por fungos filamentosos*. 67f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Ciências Biológicas - Ecologia e Biodiversidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/items/fccd7fd8-5422-4e57-83c8-6ae2fe9bed77>. Acesso em: 10 jan. 2024.

KOUL, B.; AHMAD, W.; SINGH, J. Mycoremediation: A novel approach for sustainable development. In: KUMAR, A.; SINGH, V.K.; SINGH, P.; MISHRA, V.K. (Org.). *Microbe mediated remediation of environmental contaminants*. Woodhead Publishing, 2021. p. 409-420. Series in Food Science, Technology and Nutrition. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821199-1.00030-4>

KUMAR, R.; NEGI, S.; SHARMA, P.; PRASHER, I.B.; CHAUDHARY, S.; DHAU, J.S.; UMAR, A. Wastewater cleanup using *Phlebia acerina* fungi: An insight into mycoremediation. *Journal of Environmental Management*, v. 228, p. 130-139, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.091>

LI, M.; JIANG, H.; MO, X.; LI, R.; LIU, L.; WU, W.; LIU, W.; XIE, Y.; LI, X.; YAN, F.; QIU, Z. Biostimulation accelerates landfill stabilization and resource utilization efficiency, providing feasible technical support for the overall lifecycle management of landfills. *Chemosphere*, v. 364, 142984, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142984>

MOHAMMADIAN, E.; AHARI, A.B.; ARZANLOU, M.; OUSTAN, S.; KHAZAEI, S.H. Tolerance to heavy metals in filamentous fungi isolated from contaminated mining soils in the Zanjan Province, Iran. *Chemosphere*, v. 185, p. 290-296, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.022>

NAZIR, A.; SARFRAZ, W.; ALLAH, D.; KHALID, N.; FARID, M.; SHAFIQ, M.; BAREEN, F.E.; RIZVI, Z.F.; NAEEM, N. Synergistic impact of two autochthonous saprobic fungi (*A. niger* and *T. pseudokoningii*) on the growth, ionic contents, and metals uptake in *Brassica juncea* L. and *Vigna radiata* L. under tannery solid waste contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, v. 25, n. 11, p. 1488-1500, 2023. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2166457>

OKOLI, C.; DUARTE, T. Guia para realizar uma revisão sistemática de literatura. *EaD em Foco*, v. 9, n. 1, e748, 2019. <https://doi.org/10.18264/eadfv9i1.748>

PAGANI, R.N.; KOVALESKI, J.L.; RESENDE, L.M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*, v. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>

PAGANI, R.N.; PEDROSO, B.; SANTOS, C.B.; PICININ, C.T.; KOVALESKI, J.L. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting finder and rankin. *Quality & Quantity*, v. 57, n. 5, p. 4563-4602, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11135-022-01562-y>

PESENTI, M.E.A.; MARQUES, T.A.; CAMPOS, V.A.; URATA, S.L.; PRATES, K.V.M.C. Evaluation of the bioremediation potential of *Candida* spp. and *Trichophyton* spp. fungi in the treatment of leachate from a landfill. *Holos*, v. 5, n. 39, p. 1-12, 2023. <https://doi.org/10.15628/holos.2023.16307>

SIRACUSA, G.; QIUYAN, Y.; CHICCA, I.; BARDI, A.; SPENNATI, F.; BECARELLI, S.; LEVIN, D.B.; MUNZ, G.; PETRONI, G.; DI GREGORIO, S. Mycoremediation of old and intermediate landfill leachates with an Ascomycete fungal isolate, *Lambertella* sp. *Water*, v. 12, n. 3, p. 800, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030800>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO (SNIS). *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos*. SNIS, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_RS\\_SNIS\\_2021.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

SMAOUI, Y.; FERSI, M.; MECHICHI, T.; SAYADI, S.; BOUZID, J. A new approach for detoxification of landfill leachate using *Trametes troglia*. *Environmental Engineering Research*, v. 24, n. 1, p. 144-149, 2019. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.014>

SPINA, F.; TIGINI, V.; ROMAGNOLO, A.; VARESE, G.C. Bioremediation of landfill leachate with fungi: autochthonous vs. allochthonous strains. *Life*, v. 8, n. 3, p. 27, 2018. <https://doi.org/10.3390/life8030027>

STEFANUTO, V.A.; OLIVEIRA, S.M.P.; MOREIRA, J.F.; AGUIAR, A.S.; FARIAS, E. Análise bibliométrica como ferramenta metodológica. *Revista Interdisciplinar em Educação e Pesquisa*, p. 307-326, 2022. <https://doi.org/10.36732/EditoraNovaPaideia.250>

TIGINI, V.; BEVIONE, F.; PRIGIONE, V.; POLI, A.; RANIERI, L.; SPENNATI, F.; MUNZ, G.; VARESE, G.C. Wastewater-Agar as a selection environment: A first step towards a fungal in-situ bioaugmentation strategy. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 171, p. 443-450, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jecoenv.2018.12.072>

TIGINI, V.; PRIGIONE, V.; VARESE, G.C. Mycological and ecotoxicological characterisation of landfill leachate before and after traditional treatments. *Science of the Total Environment*, v. 87, p. 335-341, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.026>

WANG, Y.; YI, B.; SUN, X.; YU, L.; WU, L.; LIU, W.; WANG, D.; LI, Y.; JIA, R.; YU, H.; LI, X. Removal and tolerance mechanism of Pb by a filamentous fungus: A case study. *Chemosphere*, v. 225, p. 200-208, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.027>

YE, R.; HUO, W.; SHAO, Y.; WANG, H.; LU, W.; ZHANG, H. Fungal community diversity and their contribution to nitrogen cycling in in-situ aerated landfills: Insights from field and laboratory studies. *Waste Management*, v. 179, p. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.048>

ZANGANEH, F.; HEIDARI, A.; SEPEHR, A.; ROHANI, A. Bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 29, n. 4, p. 6040-6059, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16061-0>

ZEGZOUTI, Y.; BOUTAFDA, A.; EZZARIAI, A.; FELS, L.E.; HADEK, M.E.; HASSANI, L.A.I.; HAFIDI, M. Bioremediation of landfill leachate by *Aspergillus flavus* in submerged culture: Evaluation of the process efficiency by physicochemical methods and 3D fluorescence spectroscopy. *Journal of Environmental Management*, v. 255, 109821, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109821>