


ABORDAGENS BIOLÓGICAS PARA BIORREMEDIAÇÃO DE ATRAZINE

BIOLOGICAL APPROACHES TO ATRAZINE BIOREMEDIATION

ENFOQUES BIOLÓGICOS PARA LA BIORREMEDEIACIÓN DE ATRAZINA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-025>

Data de submissão: 04/10/2025

Data de publicação: 04/11/2025

Rodrigo Vital Elias

Mestrando em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Endereço: Mato Grosso, Brasil
E-mail: rodrigo.vital@unemat.br

Miriam Hiroko Inoue

Doutora em Agronomia - Produção Vegetal
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Endereço: Mato Grosso, Brasil
E-mail: miriam@unemat.br

Ana Carolina Dias Guimarães

Doutora em Fitotecnia
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Endereço: Mato Grosso, Brasil
E-mail: acrdias@unemat.br

Mirella Franco de Souza

Graduanda em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)
Endereço: Mato Grosso, Brasil
E-mail: mirella.franco@unemat.br

RESUMO

A atrazina é um herbicida amplamente utilizado na agricultura brasileira, especialmente em culturas como milho e cana-de-açúcar, caracterizando-se por sua persistência no solo e na água, o que representa riscos ambientais e à saúde humana. Este estudo teve como objetivo revisar as principais estratégias biológicas de biorremediação aplicadas em ambientes contaminados por atrazina. Foi conduzida uma revisão integrativa da literatura entre 2018 e setembro de 2025, utilizando as bases Scopus, Web of Science, SciELO, BDTD e Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, seguindo o protocolo PRISMA 2020. Foram selecionados 16 estudos que abordaram a ação de bactérias, fungos e leveduras, além da influência de fatores abióticos como pH, temperatura, oxigenação e presença de íons metálicos. Os resultados indicam que os microrganismos apresentam elevado potencial de degradação da atrazina, isoladamente ou em consórcios, e que a modulação de condições ambientais é determinante para a eficácia do processo. Apesar dos avanços, ainda há desafios para aplicação em larga escala, como a padronização de métodos e a adaptação a diferentes condições de campo. Os estudos evidenciam que a biorremediação mediada por microrganismos representa uma alternativa

viável e sustentável para mitigar os impactos causados pela atrazina, favorecendo a degradação do herbicida e auxiliando na recuperação da qualidade do solo e dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Triazina. Descontaminação. Microorganismos. Enzimas.

ABSTRACT

Atrazine is a widely used herbicide in Brazilian agriculture, especially in crops such as corn and sugarcane, characterized by its persistence in soil and water, which poses environmental and human health risks. This study aimed to review the main biological bioremediation strategies applied to environments contaminated by atrazine. An integrative literature review was conducted between 2018 and September 2025, using the Scopus, Web of Science, SciELO, BDTD, and CAPES Theses and Dissertations Catalog databases, following the PRISMA 2020 protocol. Sixteen studies were selected, addressing the action of bacteria, fungi, and yeasts, as well as the influence of abiotic factors such as pH, temperature, oxygenation, and the presence of metal ions. The results indicate that microorganisms exhibit a high potential for atrazine degradation, either individually or in consortia, and that the modulation of environmental conditions is crucial for the effectiveness of the process. Despite significant advances, challenges remain for large-scale application, such as method standardization and adaptation to different field conditions. The study highlights that microbially mediated bioremediation represents a viable and sustainable alternative to mitigate the impacts caused by atrazine, promoting herbicide degradation and contributing to the recovery of soil and water quality.

Keywords: Triazine. Decontamination. Microorganisms. Enzymes.

RESUMEN

La atrazina es un herbicida ampliamente utilizado en la agricultura brasileña, especialmente en cultivos como el maíz y la caña de azúcar, caracterizándose por su persistencia en el suelo y en el agua, lo que representa riesgos ambientales y para la salud humana. Este estudio tuvo como objetivo revisar las principales estrategias biológicas de biorremediación aplicadas en ambientes contaminados por atrazina. Se realizó una revisión integradora de la literatura entre 2018 y septiembre de 2025, utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science, SciELO, BDTD y el Catálogo de Tesis y Disertaciones de CAPES, siguiendo el protocolo PRISMA 2020. Se seleccionaron 16 estudios que abordaron la acción de bacterias, hongos y levaduras, además de la influencia de factores abióticos como el pH, la temperatura, la oxigenación y la presencia de iones metálicos. Los resultados indican que los microorganismos presentan un alto potencial de degradación de la atrazina, ya sea de forma aislada o en consorcios, y que la modulación de las condiciones ambientales es determinante para la eficacia del proceso. A pesar de los avances, aún existen desafíos para su aplicación a gran escala, como la estandarización de los métodos y la adaptación a diferentes condiciones de campo. Los estudios evidencian que la biorremediación mediada por microorganismos representa una alternativa viable y sostenible para mitigar los impactos causados por la atrazina, favoreciendo la degradación del herbicida y contribuyendo a la recuperación de la calidad del suelo y de los recursos hídricos.

Palabras clave: Triazina. Descontaminación. Microorganismos. Enzimas.

1 INTRODUÇÃO

O uso de herbicidas consolidou-se como a principal forma de manejo de plantas daninhas. No Brasil, especialmente em Mato Grosso, o consumo é elevado, totalizando 150.981,23 toneladas de ingredientes ativos, com destaque para glyphosate, 2,4-D e atrazina (Matti; Michellon, 2021; IBAMA, 2023). Essa dependência de químicos reflete impactos ambientais e riscos à saúde humana, já que após a aplicação, os pesticidas podem se dispersar pelo ar, infiltrar-se na água ou aderir ao solo, afetando populações rurais (Medeirosa *et al.*, 2021; Gómez-Beltrán *et al.*, 2021; Massuquini *et al.*, 2024).

A atrazina (2-cloro-4-etilamino-6-isopropilamino-s-triazina) é um herbicida seletivo amplamente utilizado em culturas como milho e cana-de-açúcar, eficaz contra plantas daninhas de folhas largas e gramíneas (Wu *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2020). Contudo, seu uso contínuo causa sérios impactos ambientais devido à alta persistência e baixa degradabilidade (De Souza *et al.*, 2020; Toller *et al.*, 2021; Hong *et al.*, 2022; Gajendra *et al.*, 2024). Trata-se de um composto altamente persistente, com meia-vida entre 41 e 231 dias, sua estabilidade favorece o transporte no ambiente, elevando o risco de contaminação e afetando organismos aquáticos, a microbiota do solo e a qualidade da água e dos alimentos, mesmo em baixas concentrações (Karlsson *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2020; Utzig, Grade e Boroski, 2021; Sánchez *et al.*, 2020). Além disso, a persistência do composto pode provocar o fenômeno de *carryover*, prejudicando culturas subsequentes sensíveis, como feijão e hortaliças (Serafini, 2020).

Devido a esses impactos, o uso desse herbicida foi banido em países como Índia, Itália, Alemanha, Dinamarca, Finlândia e em toda a União Europeia (Scherr *et al.*, 2017; Salazar-Ledesma *et al.*, 2018; Araya *et al.*, 2024). Diferentemente, o Brasil ainda permite a aplicação de atrazina, de acordo com as normas ambientais e de saúde em vigor. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, do Ministério da Saúde, é permitido um valor máximo de $2,0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para águas potáveis. Ao mesmo tempo, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) classifica o herbicida como “altamente persistente”, o que exige vigilância ambiental contínua.

A busca por soluções sustentáveis na gestão desses resíduos agrícolas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas na biorremediação, uma alternativa promissora que utiliza enzimas produzidas por bactérias, fungos e plantas capazes de metabolizar contaminantes ambientais, utilizando-os como fonte de carbono e energia (Mallmann *et al.*, 2019; Fernandes, 2021; Bala *et al.*, 2022; Gonçalves & Delabona, 2022).

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo reunir e sistematizar, por meio de revisão integrativa, as evidências científicas sobre estratégias biológicas aplicadas à descontaminação de

ambientes afetados pela atrazina, destacando o potencial adaptativo, o baixo custo e a elevada capacidade enzimática dos microrganismos na degradação, além da influência de fatores abióticos nesse processo.

2 METODOLOGIA

Este estudo consiste em uma revisão integrativa da literatura, modalidade metodológica que visa reunir, analisar e sintetizar de forma sistemática, os resultados de pesquisas relevantes sobre um tema específico. Conforme explicam Souza, Silva e Carvalho (2010), esse tipo de revisão permite a integração de diferentes abordagens metodológicas, possibilitando uma visão abrangente e aprofundada do conhecimento produzido sobre a temática em foco.

A abordagem adotada foi quali-quantitativa, pois, segundo Minayo (2012), essa combinação permite analisar os dados tanto em sua dimensão objetiva, por meio de indicadores quantitativos, quanto subjetiva, por meio da interpretação de significados.

Para a definição da estratégia de busca, foi utilizado o modelo PICO (População, Intervenção, Comparação e Desfecho), ferramenta amplamente empregada na formulação de questões em revisões sistemáticas integradoras. De acordo com Santos, Pimenta e Nobre (2007), o uso do PICO contribui para delimitar com clareza os elementos centrais da pesquisa, garantindo precisão e coerência na seleção dos estudos a serem incluídos na revisão. O detalhamento dos elementos da estratégia PICO, bem como os descritores utilizados, é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Estratégia PICO e descritores utilizados na pesquisa

Elemento	Descrição	Palavras-chave/Descritores
P – População	Ambientes contaminados com atrazina	“atrazina”, “herbicida”, “contaminação ambiental”
I – Intervenção	Estratégias biológicas de biorremediação	“microrganismos”, “macrofungos”, “bactérias”, “leveduras”, “biorremediação”, “biodegradação”
C – Comparação	Ambientes contaminados sem intervenção biológica	“sem tratamento”, “degradação natural”, “processos abióticos”
O – Desfecho	Redução da toxicidade e degradação da atrazina	“biodegradação”, “eficiência da remediação”, “toxicidade reduzida”

Fonte: Resultados originais da pesquisa (2025)

A coleta de dados ocorreu entre julho até setembro de 2025, por meio das bases Scopus, Web of Science, SciELO, Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e o Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES. A busca abrangeu publicações indexadas e não indexadas, visando contemplar tanto a literatura científica quanto produções acadêmicas relevantes.

Foram incluídos estudos publicados entre 2018 até setembro de 2025, disponíveis na íntegra, redigidos em português, inglês ou espanhol, que abordassem diretamente a degradação da atrazina por

microrganismos e técnicas microbiológicas relacionadas. Foram excluídos estudos duplicados, revisões narrativas, trabalhos que não abordavam especificamente a atrazina, artigos sem descrição metodológica clara ou sem resultados aplicáveis à biorremediação.

As estratégias de busca foram elaboradas a partir dos descritores definidos pela estrutura PICO, combinando operadores booleanos AND e OR para ampliar e refinar os resultados em cada base. As expressões foram adaptadas conforme os critérios de indexação de cada plataforma, conforme detalhado no Quadro 2.

Quadro 2 – Estratégias de busca utilizadas nas bases de dados

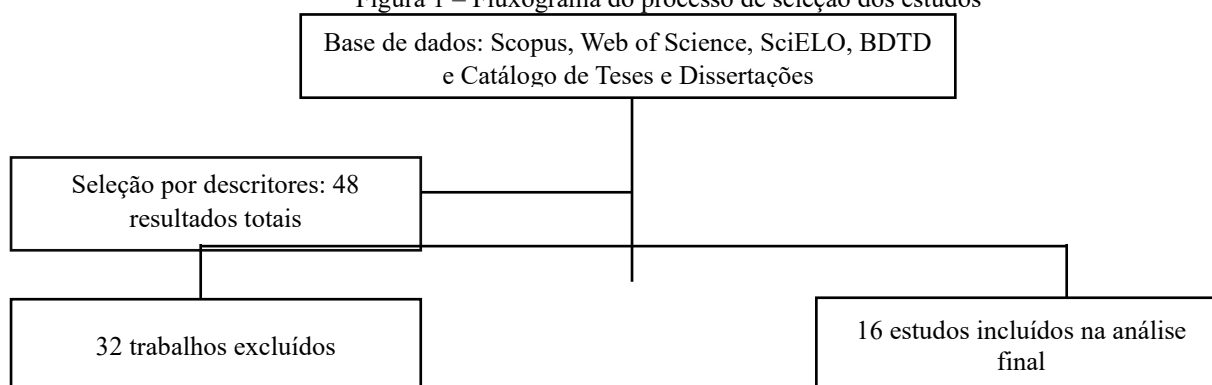
Base de Dados	Estratégia de Busca
Scopus	("atrazine" AND "bioremediation" AND ("microorganisms" OR "fungi" OR "bacteria" OR "yeast"))
Web of Science	("atrazine" AND "biodegradation" AND ("microbial degradation" OR "biological remediation"))
SciELO	("atrazina" AND "biorremediação" AND ("microrganismos" OR "fungos" OR "bactérias" OR "leveduras"))
BDTD/CAPES	("atrazina" AND "estratégias biológicas" AND "remediação ambiental")

Fonte: Resultados originais da pesquisa (2025)

A seleção dos estudos seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), adotando uma triagem em três etapas: leitura dos títulos, análise dos resumos e avaliação do texto completo. Inicialmente, foram identificados 48 trabalhos nas cinco bases de dados consultadas.

A Figura 1 apresenta o fluxograma adaptado do PRISMA, ilustrando as fases de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão.

Figura 1 – Fluxograma do processo de seleção dos estudos



Fonte: Autores

O fluxograma demonstra a trajetória metodológica da revisão, evidenciando que, após a busca nas bases de dados, os 48 estudos encontrados foram submetidos a leitura criteriosa dos títulos e

resumos, resultando na exclusão de 32 por não atenderem aos critérios previamente definidos. Os 16 estudos remanescentes foram integralmente avaliados e compuseram o corpo final da análise.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi possível selecionar estudos que investigam os efeitos da atrazina no solo, água e remoção em matrizes ambientais, especialmente solo e água, destacando a eficiência das bactérias, fungos e leveduras como agentes biorremediadores. Os resultados indicam avanços significativos no uso de tecnologias biológicas para o tratamento de contaminantes agrícolas.

3.1 ALTERNATIVAS DE BIORREMEDIAÇÃO EM ÁGUAS CONTAMINADAS POR ATRAZINE

Entre as alternativas investigadas, o uso de filtros de carvão ativado granular associados a microrganismos tem apresentado resultados expressivos, alcançando taxas de remoção superiores a 89% por meio da combinação entre adsorção física e degradação biológica. Essa abordagem mostrou-se promissora para estações de tratamento de pequeno e médio porte, por aliar baixo custo operacional e alta eficiência (Canevaroli *et al.*, 2021).

Além disso, carvões ativados modificados quimicamente têm apresentado elevada capacidade de adsorção em diferentes condições de pH, o que amplia sua aplicabilidade em diferentes tipos de efluentes (Ferreira, 2024). Compósitos bimetálicos, como o Co/Zr@AC, demonstraram eficiência de remoção de até 97,5% em apenas 90 minutos sob pH 4, evidenciando que as modificações químicas realizadas no adsorvente intensificam as interações físico-químicas e, conseqüentemente, aprimoram o desempenho do processo (Hu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2024).

Apesar desses avanços, a adsorção isolada ainda enfrenta limitações, como a saturação do material e a geração de resíduos. Para superar essas barreiras, estratégias híbridas que integram adsorção com processos regenerativos ou biológicos têm se mostrado alternativas robustas. Um exemplo é o sistema GAC + ozônio, que, ao empregar regeneração intermitente com micro e nanobolhas de ozônio, alcançou até 99,9% de remoção de atrazina, mantendo a integridade do carvão ativado e reduzindo custos operacionais em aplicações piloto (Liu *et al.*, 2024; Kajjumba *et al.*, 2025; Shi *et al.*, 2025).

A bioaugmentação e consórcios microbianos também têm sido explorados para acelerar a degradação de herbicidas. Isolados marinhos mostraram alta capacidade de degradar atrazina em concentrações elevadas (resíduos variando de 150-400 mg/L) com eficiência entre 75-97 %, dependendo da cepa (Zhao *et al.*, 2019; Allatas *et al.*, 2023). Fora do contexto marinho, fungos imobilizados em reatores de leito fixo também reduziram significativamente a meia-vida da atrazina

em águas contaminadas, mostrando viabilidade de uso contínuo (Dhiman *et al.*, 2020; Raiman *et al.*, 2021; Levio-Raiman *et al.*, 2021; Efremenko *et al.*, 2024).

Além dessas abordagens, a aplicação de técnicas de engenharia genética tem ampliado as possibilidades de uso de microrganismos adaptados para ambientes contaminados. Cepas bacterianas e fúngicas modificadas demonstram maior tolerância a condições adversas, como pH extremo ou alta carga de poluentes, mantendo taxas de degradação consistentes (Jo *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2024; Shah *et al.*, 2024). Em paralelo, estudos recentes destacam que a combinação entre biofilmes microbianos e suportes porosos pode potencializar a estabilidade dos consórcios e prolongar sua atividade degradativa em sistemas contínuos, indicando um avanço importante para a escalabilidade e a sustentabilidade dos processos de biorremediação (Tong *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2024).

Observa-se que não existe uma única estratégia para a remoção de atrazina. Em regiões com recursos limitados, pode-se recorrer a adsorventes naturais, enquanto em contextos com maior investimento ou com contaminação persistente, as soluções híbridas como adsorção associada à regeneração, bioaumentação ou uso de compostos modificados que apresentam eficiências superiores. Além disso, fatores como pH, temperatura, presença de metabólitos tóxicos ou intermediários e manutenção do consórcio microbiano são determinantes para o sucesso prático das estratégias aplicadas (Kolekar *et al.*, 2019; Bender, 2022; Diviesti, 2023; Li *et al.*, 2024; Melo, 2024).

Essa diversidade de abordagens amplia a aplicabilidade prática e reforça como o conhecimento científico pode ser convertido em soluções acessíveis e adaptáveis. Em ambientes aquáticos, destaca-se o potencial de integração de processos híbridos, enquanto em solos, cuja dinâmica é mais complexa.

3.2 ESTRATÉGIAS MICROBIANAS PARA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR ATRAZINE

A recuperação de solos contaminados depende fortemente de processos biológicos, as estratégias de biorremediação exploram a diversidade metabólica de bactérias e fungos capazes de degradar poluentes complexos. Em solos contaminados por herbicidas, pesticidas e hidrocarbonetos, consórcios microbianos apresentam vantagens em relação ao uso de cepas isoladas, pois diferentes espécies atuam de forma complementar na quebra de compostos tóxicos (Lázaro-Mass *et al.*, 2023; Fahmy *et al.*, 2024; De Oliveira Paula *et al.*, 2025).

A exposição prolongada à atrazina provoca alterações significativas na comunidade microbiana do solo, reduzindo sua diversidade e comprometendo o equilíbrio ecológico. Esse estresse ambiental também favorece o surgimento de microrganismos especializados capazes de degradar o composto, o que abre novas possibilidades para o desenvolvimento de estratégias biológicas de remediação

(Fernandes, 2018). Entre essas estratégias, destacam-se os estudos que evidenciam a atuação de fungos na degradação de herbicidas persistentes como a atrazine (Bravim *et al.*, 2020; Guzman *et al.*, 2025). Outro exemplo promissor é o uso de leveduras, como *Saccharomyces cerevisiae*, que, quando associada à palha de milho como suporte e fonte de carbono, acelerou significativamente a degradação da atrazine no solo, representando uma solução de baixo custo e que aproveita resíduos agroindustriais (Toller, 2019; Toller, Guimarães & Bravo, 2021).

Além dos fungos e leveduras, pesquisas recentes têm destacado o papel crucial das bactérias especializadas na biorremediação da atrazine. Espécies como *Paenarthrobacter ureafaciens* apresentam genes específicos *trzN*, *atzB* e *atzC* responsáveis por sua alta capacidade degradativa. Em solos contaminados, a inoculação dessa bactéria não apenas acelerou a remoção do herbicida, mas também estimulou o crescimento da biomassa microbiana e favoreceu o desenvolvimento de comunidades nativas benéficas, como *Streptomyces* e *Bacillus*, resultando na formação de ácido cianúrico, um composto de menor toxicidade (Zhao *et al.*, 2023).

De forma abrangente, microrganismos sejam bactérias ou fungos demonstram potencial para transformar poluentes em formas menos tóxicas, consolidando-se como pilares de estratégias sustentáveis de manejo ambiental (Ayilara & Babalola, 2023; Ali, 2025; Liu *et al.*, 2025). Tecnologias como a fermentação em estado sólido (SSF) vêm ampliando esse potencial, ao utilizar resíduos orgânicos para o cultivo de microrganismos capazes de degradar atrazine e, simultaneamente, gerar compostos de valor agregado, integrando a biorremediação aos princípios da economia circular (Birgovan *et al.*, 2025; Dey *et al.*, 2025; Frumuzachi *et al.*, 2025).

Essas abordagens biotecnológicas não apenas reduzem custos e a dependência de métodos físico-químicos, mas também fortalecem a sustentabilidade ambiental, oferecendo soluções eficazes e ecologicamente alinhadas para a mitigação da contaminação por atrazine (Kuppan *et al.*, 2024; Maglione *et al.*, 2024; Sanjana *et al.*, 2024).

Dessa forma, observa-se que a biorremediação mediada por comunidades microbianas representa uma alternativa viável, sustentável e adaptável para mitigar impactos de intoxicação em ambientes causados por atrazine. A integração entre diferentes grupos de microrganismos bactérias, fungos e leveduras e o uso de substratos orgânicos ou resíduos agroindustriais potencializam a eficiência dos processos degradativos, ao mesmo tempo em que reduzem custos e impactos ambientais.

3.3 OTIMIZAÇÃO DOS FATORES ABIÓTICOS PARA BIORREMEDIAÇÃO DE ATRAZINE.

O sucesso das técnicas biológicas de biorremediação depende fortemente das condições ambientais, que influenciam diretamente a atividade e o metabolismo dos microrganismos

degradadores. A ação biológica não ocorre de forma automática, exigindo um equilíbrio cuidadoso entre fatores físicos e químicos do meio. Matias et al. (2021) destacam que variáveis como oxigênio, pH e temperatura exercem papel determinante na biodegradação, demonstrando que ambientes aeróbicos favorecem o desempenho microbiano, enquanto a ausência de oxigênio reduz drasticamente a velocidade do processo. Assim, o controle dessas condições é essencial para otimizar as práticas de remediação.

Entre os fatores abióticos que afetam a eficiência da degradação da atrazina, destacam-se o pH, disponibilidade de oxigênio, temperatura, concentração inicial do contaminante, presença de íons metálicos e a agitação do meio. Estudos mostram que *Bacillus badius* ABP6 apresenta eficiência máxima de degradação em torno de 30 °C e pH neutro (7,0), enquanto *Klebsiella variicola* FH-1 atinge melhor desempenho a 25 °C e pH alcalino (9,0), evidenciando que cada cepa possui exigências fisiológicas e enzimáticas específicas (Zhang et al., 2019; Khatoon et al., 2020). Essas diferenças ressaltam a importância de ajustar as variáveis ambientais conforme as características metabólicas da espécie empregada.

Além das condições físico-químicas, a concentração inicial do herbicida é outro fator decisivo. Níveis muito altos podem gerar estresse celular e toxicidade, reduzindo a atividade microbiana. Pesquisas apontam que há uma faixa ideal de concentração em que a degradação é eficiente, e ultrapassar esse limite pode comprometer o processo (Pertile et al., 2020; Singh et al., 2020; Wang et al., 2024). Dessa forma, a otimização da biorremediação exige considerar não apenas a biologia dos microrganismos, mas também a dinâmica física e química do ambiente.

Outro elemento crucial são os íons metálicos, que modulam a atividade enzimática envolvida na degradação de poluentes. Eles podem atuar como cofatores essenciais, influenciando a estrutura, a estabilidade e a função das enzimas. Estudos demonstram que metais como o cobre (Cu²⁺) são fundamentais para a atividade de enzimas oxidativas, como as lacases, que participam da transformação de compostos xenobióticos. No entanto, quando presentes em excesso, esses mesmos metais podem inibir a atividade enzimática, comprometendo a eficiência do processo (Janusz et al., 2023; Yue et al., 2024; Liu et al., 2025; Singh et al., 2025; Patel et al., 2022; Thathola et al., 2024; Gao et al., 2025; Othman & Flaifil, 2025).

De forma semelhante, concentrações elevadas de metais pesados podem induzir o estresse oxidativo nas células microbianas, levando à produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) que danificam componentes essenciais à sobrevivência celular (Khalid et al., 2020; Fashola et al., 2023). Por outro lado, níveis equilibrados de certos metais podem estimular a expressão de genes

degradadores e favorecer respostas adaptativas que aumentam a eficiência da biorremediação (Moretto *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2023; Capdevila *et al.*, 2024; González *et al.*, 2025).

Em síntese, a eficiência da biorremediação resulta da interação entre fatores biológicos e abióticos, exigindo controle rigoroso de variáveis como pH, temperatura, oxigênio e íons metálicos. Quando adequadamente manejada, essa abordagem torna-se uma estratégia eficaz e sustentável para a recuperação de ambientes contaminados por herbicidas como a atrazina.

4 CONCLUSÃO

De modo geral, a revisão evidencia que as abordagens biológicas de biorremediação constituem alternativas promissoras, sustentáveis e de alta eficiência para mitigar os impactos da contaminação ambiental por atrazina. As pesquisas analisadas demonstram que bactérias, fungos e leveduras possuem mecanismos enzimáticos capazes de transformar o herbicida em compostos de menor toxicidade, contribuindo para a recuperação da qualidade do solo e da água. A integração de consórcios microbianos e o uso de resíduos agroindustriais como substrato reforçam a viabilidade econômica e ambiental dessas estratégias, além de alinhar-se aos princípios da economia circular.

Ainda assim, persistem desafios relacionados à padronização metodológica, à estabilidade microbiana em condições variáveis e à adaptação em escala de campo. Avanços recentes em engenharia genética, bioprocessos e sistemas híbridos de adsorção e biodegradação indicam caminhos promissores para o aprimoramento dessas técnicas. Assim, a biorremediação baseada em microrganismos consolida-se como uma ferramenta essencial para a gestão ambiental moderna, oferecendo soluções eficazes e ecologicamente responsáveis para o controle da poluição por herbicidas persistentes como a atrazina.

REFERÊNCIAS

- ALI, H. A; & FARHAN, M. B. Bioremediation Techniques for Water and Soil Pollution. *Natural and Engineering Sciences*, v. 10, n. 1, p. 89-109, 2025.
- ARAYA G, et al. Pesticide leaching potential in groundwater: a historical review and critical analysis. *Environ Toxicol Chem*. 2024.
- AYILARA, M. S; BABALOLA, O. O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, v. 5, p. 1183691, 2023.
- BALA S, G. D, THIRUMALESH B.V, SHARMA M, SRIDHAR K, INBARAJ B.S, TRIPATHI M. Estratégias recentes para biorremediação de poluentes emergentes: uma revisão para um ambiente verde e sustentável. *Tóxicos* 10(8):484. 2022.
- BENDER, LUANA BERTOLO Y. CASTRO. Avaliação da remoção de atrazina e clomazone de águas superficiais por microalgas. 2022.
- BHATTI, PRIYANKA et al. Ultimate fate and possible ecological risks associated with atrazine and its principal metabolites (DIA and DEA) in soil and water environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 248, p. 114299, 2022.
- BIRGOVAN, ANDREEA LOREDANA et al. Harnessing Microbial Power for a Sustainable Future Food System. *Microorganisms*, v. 13, n. 9, p. 2217, 2025.
- BRAVIM, N. P. B; ALVES, A. F; ORLANDA, J. F. F. Biodegradation of atrazine, glyphosate and pendimetaline employing fungal consortia. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, p. e1549119679-e1549119679, 2020.
- CANEVAROLI, MIRIAM RUIZ et al. Remoção de herbicida atrazina por meio de filtros de carvão ativado granular associados com microrganismos no tratamento de água para abastecimento. *Eng Sanit Ambient*, v.26 n.2, mar/abr. 263-272. 2021.
- CAPDEVILA, DAIANA A. et al. Bacterial metallostasis: metal sensing, metalloproteome remodeling, and metal trafficking. *Chemical Reviews*, v. 124, n. 24, p. 13574-13659, 2024.
- DE OLIVEIRA PAULA, M. P., ROESCH, L. F. W., RAMOS, A. C., TÓTOLA, M. R., & PYLRO, V. S. Bacterial consortia enhance glyphosate breakdown and drive soil microbial dynamics. *Chemosphere*, 387, 144677. 2025.
- DE SOUZA, R. M., SEIBERT, D., QUESADA, H. B., DE JESUS BASSETTI, F., FAGUNDES-KLEN, M. R., & BERGAMASCO, R. occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: a review. *process safety and environmental protection*, 135, 22-37. 2020.
- DEY, S., TALUKDAR, A., & BHATTACHARYA, S. Microbial degradation and valorization of food wastes: waste to wealth approaches towards sustainability. *Discover Chemistry*, 2(1), 1-22. 2025.
- DHIMAN, N., JASROTIA, T., SHARMA, P., NEGI, S., CHAUDHARY, S., KUMAR, R., ... & KUMAR, R. Immobilization interaction between xenobiotic and *Bjerkandera adusta* for the biodegradation of atrazine. *Chemosphere*, 257, 127060. 2020.

DIVIESTI, K., RUSSELL-PARKS, G. A., TREWYN, B. G., & HOLZ, R. C. Atrazine Degradation Using Immobilized Triazine Hydrolase from *Arthrobacter aurescens* TC1 in Mesoporous Silica Nanomaterials. *ACS Environmental Au*, 3(6), 361-369. 2023.

FAN, M., TAN, S., WANG, W., & ZHANG, X. Improvement in salt tolerance ability of *Pseudomonas putida* KT2440. *Biology*, 13(6), 404. 2024.

FASHOLA, M., ANAGUN, O., & BABALOLA, O. O. Heavy metal pollution: Toxic effects on bacterial cells. *Authorea Preprints*. 2023.

FAHMY, M. A., SALEM, S. H., EL-FATTAH, H. I. A., AKL, B. A., FAYEZ, M., MAHER, M., ... & SITOHY, M. Insights into the role of hexa-bacterial consortium for bioremediation of soil contaminated with chlorantraniliprole. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 197. 2024.

FERNANDES, J. A. F., & SILVA, L. D. N. A. Técnicas de biorremediação microbiana de solos contaminados com metais pesados. In XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Salvador, BA. 2021.

FERNANDES, A.F.T. Atrazina: biodegradação e efeitos na comunidade bacteriana do solo. 2018, 73 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2018.

FERREIRA, E. D. Estudo da adsorção do herbicida atrazina com carvões ativados e sulfonados. 2024. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

FRUMUZACHI, O., NICOLESCU, A., MARTĂU, G. A., ODOCHEANU, R., RANGA, F., MOCAN, A., & VODNAR, D. C. Sustainable valorization of lignocellulosic corn husks via solid-state fermentation: enhanced recovery of phenolic compounds and organic acids. *Bioresource Technology*, 132959. 2025.

GAJENDRA, G., PULIMI, M., NATARAJAN, C., & MUKHERJEE, A. Occurrence, toxicodynamics, and mechanistic insights for atrazine degradation in the environment. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(10), 649. 2024.

GAO, Q., ZHAO, Y., LU, L., HAN, L., & XU, L. Sensitive and specific colorimetric detection of glyphosate utilizing laccase-mimicking activity of copper-based metal-organic framework. *Talanta*, 293, 128144. 2025.

GOMES, P. S. P. Estudo da recuperação do herbicida atrazina em águas naturais empregando Cromatografia Líquida de Alta eficiência (HPLC). *Anais dos Seminários de Iniciação Científica*, (22). 2018.

GÓMEZ-BELTRÁN MVZ, D. A., QF, C. P., & VILLAR ARGAIZ MVZ, D. Environmental fate and ecological effects of the three most commonly used herbicides in Colombia. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 16(2), 47-75. 2021.

GONZÁLEZ BRAMBILA, M. M., LEÓN SANTIESTEBAN, H. H., TREJO AGUILAR, G. M., COLÍN LUNA, J. A., GARCÍA MARTÍNEZ, J. C., & REYES CHILPA, R. Biodegradation of

atrazine, a review of its metabolic pathways. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 22(11), 1265-1288. 2025.

HONG, J., BOUSSETTA, N., ENDERLIN, G., MERLIER, F., & GRIMI, N. Degradation of residual herbicide atrazine in agri-food and washing water. *Foods*, 11(16), 2416. 2022.

HU, Y., XIAO, R., KUANG, B., HU, Y., WANG, Y., BAI, J., ... & PAN, W. Application of modified biochar in the treatment of pesticide wastewater by constructed wetland. *Water*, 14(23), 3889. 2022.

HUERGO, E. M. Potencial de biodegradação de atrazina por bactérias isoladas de solo agrícola. 56 f. 2024. Tese (Dissertação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental: análise e tecnologia ambiental, Francisco Beltrão – PR, 2024.

IBAMA. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis. Relatório anual. em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 17 de set de 2025.

JANUSZ, G., SKWAREK, E., & PAWLIK, A. Potential of laccase as a tool for biodegradation of wastewater micropollutants. *Water*, 15(21), 3770. 2023.

JIANG, Z., LI, J., JIANG, D., GAO, Y., CHEN, Y., WANG, W., ... & ZHANG, Y. Removal of atrazine by biochar-supported zero-valent iron catalyzed persulfate oxidation: reactivity, radical production and transformation pathway. *Environmental Research*, 184, 109260. 2020.

JO, C., ZHANG, J., TAM, J. M., CHURCH, G. M., KHALIL, A. S., SEGRE, D., & TANG, T. C. Unlocking the magic in mycelium: Using synthetic biology to optimize filamentous fungi for biomanufacturing and sustainability. *Materials Today Bio*, 19, 100560. 2023.

KAJJUMBA, G. W., WASHINGTON, C., MOHAN, A., YU, Z., SCHIMMOLLER, L., GONZALEZ, J., ... & DICKENSON, E. Application of granular and ozone-biological activated carbon treatments for the mitigation of organic chemical peaking events in potable water schemes. *Water Research X*, 100389. 2025.

KARLSSON, AS, L. WEIHERMÜLLER, W. TAPPE, S. MUKHERJEE E S. SPIELVOGEL. Resíduos de boscalídeos em escala de campo e estimativa da meia-vida de dissipação em solo arenoso. *Chemosphere* 145:163–173. 2016

KHALID, M., HASSANI, S., & ABDOLLAHI, M. Metal-induced oxidative stress: an evidence-based update of advantages and disadvantages. *Current opinion in toxicology*, 20, 55-68. 2020.

KOLEKAR, P. D., PATIL, S. M., SURYAVANSHI, M. V., SURYAWANSHI, S. S., KHANDARE, R. V., GOVINDWAR, S. P., & JADHAV, J. P. Microcosm study of atrazine bioremediation by indigenous microorganisms and cytotoxicity of biodegraded metabolites. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 66-73. 2019.

KUPPAN, N., PADMAN, M., MAHADEVA, M., SRINIVASAN, S., & DEVARAJAN, R. A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco friendly solutions for waste and pollution management. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 154-171. 2024.

LÁZARO-MASS, S., GÓMEZ-CORNELIO, S., CASTILLO-VIDAL, M., ALVAREZ-VILLAGOMEZ, C. S., QUINTANA, P., & DE LA ROSA-GARCÍA, S. Biodegradation of hydrocarbons from contaminated soils by microbial consortia: A laboratory microcosm study. *Electronic Journal of Biotechnology*, 61, 24-32. 2023.

LEVIO-RAIMAN, M., BRICEÑO, G., LEIVA, B., LÓPEZ, S., SCHALCHLI, H., LAMILLA, C., ... & DIEZ, M. C. Treatment of pesticide-contaminated water using a selected fungal consortium: Study in a batch and packed-bed bioreactor. *Agronomy*, 11(4), 743. 2021.

LI, X., CAO, X., WANG, H., SUN, Y., ZHANG, S., KHODSEEWONG, S., & SAKAMAKI, T. The promotion of the atrazine degradation mechanism by humic acid in a soil microbial electrochemical system. *Journal of Environmental Management*, 357, 120767. 2024.

LIU, P., WEN, S., ZHU, S., HU, X., & WANG, Y. Microbial Degradation of Soil Organic Pollutants: Mechanisms, Challenges, and Advances in Forest Ecosystem Management. *Processes*, 13(3), 916. 2025.

LIU, Z., LIU, L., LIU, Y., WANG, Y., & YU, L. Recent Advances and Challenges in Biomolecule-Based Laccase Mimics for Environmental Applications. *Catalysts*, 15(10), 932. 2025.

LOPES, F. M. Sorção e dessorção de atrazina, e frações de carbono orgânico em solo cultivado com plantas de cobertura. 44 f. 2018. Dissertação (Mestrado em ciências agrárias) - Universidade Federal do Piauí, Campus Professora Cinobelina Elvas, Bom Jesus - PI, 2018.

LU, Y.-S., YANG, S.-L., GOU, C.-L., WANG, X.-L., WEN, X., HE, X.-R., GUO, X. X., XU, Y.-Y., YU, J., & QIU, J. Análises integradas de metabolômica e transcriptômica revelam novos biomarcadores e insights mecanicistas sobre exposições à atrazina em células MCF-7. *Ecotoxicologia e Segurança Ambiental*, 232, 113244. 2022.

MAGLIONE, G., ZINNO, P., TROPEA, A., MUSSAGY, C. U., DUFOSSÉ, L., GIUFFRIDA, D., & MONDELLO, A. Microbes' role in environmental pollution and remediation: a bioeconomy focus approach. *AIMS microbiology*, 10(3), 723. 2024.

MALLMANN, V., ARAGÃO, L. W. R., FERNANDES, S. S. L., FERNANDES, T. C. L., ARAGÃO, R. F. R., & DA SILVA, R. C. D. L. As vantagens da biorremediação na qualidade ambiental. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 23(1), 12-15. 2019.

MARCHESAN, E. D. Destino no ambiente e comportamento agrônomico de atrazina em resposta a doses e níveis de palha de espécies de cobertura de solo. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

MASSUQUINI, Z., INOUE, M. H., DA SILVA SANTOS, B., DE OLIVEIRA JÚNIOR, R. S., GUIMARÃES, A. C. D., MENDES, K. F., & MARTINEZ, R. A. S. ÍNDICE DE RISCO AMBIENTAL DOS PRINCIPAIS HERBICIDAS UTILIZADOS NO ESTADO DE MATO GROSSO. *ARACÊ*, 6(2), 2970-3005.2024.

MATIAS, T. P., BRAGA, J. K., DAMASCENO, L. H. S., & BRUCHA, G. Aspectos envolvidos na biodegradação da atrazina sob diferentes condições de oxirredução. *Research, Society and Development*, 10(8), e59910817689-e59910817689.2021.

MATTI, T. F.; MICHELLON, E. Panorama da agricultura orgânica e dos agrotóxicos no Brasil : uma análise a partir dos censos 2006 e 2017. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 59, n. 4, p. 1–23, 2021.

MEDEIROS, J. F.; ACAYABA, R. D'A.; MONTAGNER, C. C. A química na avaliação do impacto à saúde humana diante da exposição aos pesticidas. *Química Nova*, v 44, n. 5, p. 584-598, 2021.

MELO, T. B. Remoção de atrazina e simazina em águas pela técnica de tratamento de ciclo completo e adsorção em carvão ativado. 2024.

MINAYO, M. C. S. Análise qualitativa: teoria, passos e fidedignidade. *Ciência & saúde coletiva*, v. 17, p. 621-626, 2012.

MORETTO, J. A. S., BRAZ, V. S., FURLAN, J. P. R., & STEHLING, E. G. Plasmids associated with heavy metal resistance and herbicide degradation potential in bacterial isolates obtained from two Brazilian regions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 314. 2019.

NASCIMENTO, R. C. Avaliação da liberação controlada e fotodegradação de atrazina no cultivo de milho. 2020. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

OTHMAN, A. M; FLAIFIL, A. G. Characterization and evaluation of the immobilized laccase enzyme potential in dye degradation via one factor and response surface methodology approaches. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 735, 2025.

PATEL, S.K.S; KALIA, V.C.; LEE, J.K. Laccase immobilization on copper-magnetic nanoparticles for efficient bisphenol degradation. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 33, n. 1, p. 127, 2022.

REN, Z., ZHOU, Y., LU, Z., LIU, X., & LIU, G. Biofilm reactor with permeable materials as carriers archives better and more stable performance in treatment of slightly polluted water during long-term operation. *Water*, 15(13), 2415. 2023.

SALAZAR-LEDESMA, M., PRADO, B., ZAMORA, O., & SIEBE, C. Mobilidade da atrazina em solos de um campo de milho irrigado com águas residuais. *Agricultura, Ecosistemas e Meio Ambiente*, 255, 73–83. 2018.

SÁNCHEZ, O. F., LIN, L., BRYAN, C. J., XIE, J., FREEMAN, J. L., & YUAN, C. Profiling epigenetic changes in human cell line induced by atrazine exposure. *Environmental pollution*, 258, 113712. 2020.

SANJANA, M., PRAJNA, R., URVI, S. K., & KAVITHA, R. V. Bioremediation—the recent drift towards a sustainable environment. *Environmental Science: Advances*, 3(8), 1097-1110. 2024.

SANTOS, C. M. D. C., PIMENTA, C. A. D. M., & NOBRE, M. R. C. A estratégia PICO para a construção da pergunta de pesquisa e busca de evidências. *Revista latino-americana de enfermagem*, 15, 508-511. 2007.

SCHERR, K.E, BIELSKÁ, L., KOSUBOVÁ, P., DINISOVA, P., HVÝZDOVÁ, M., ŠIMEK, Z., & HOFMAN, J. Ocorrência de herbicidas Clorotriazina e seus produtos de transformação em solos aráveis. *Poluição Ambiental*. 2017.

SERAFINI, C. G. Aplicação do Herbicida Atrazina em Solo: efeitos sobre indicadores microbianos e análise de sua atenuação. 59 f. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS. 2020.

SHAH, B. A., MALHOTRA, H., PAPADE, S. E., DHAMALE, T., INGALE, O. P., KASARLAWAR, S. T., & PHALE, P. S. Microbial degradation of contaminants of emerging concern: metabolic, genetic and omics insights for enhanced bioremediation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1470522.2024.

SHI, W., CHENG, Y., LI, X., ZHANG, X., PANG, H., QI, J., & HU, C. Synergistic removal of pesticides and transformation products through optimization of ozonation and granular activated carbon filtration parameters toward achieving toxin-free drinking water. *Journal of Water Process Engineering*, 77, 108598. 2025.

SINGH, A. K., ABELLANAS-PEREZ, P., DE ANDRADES, D., CORNET, I., FERNANDEZ-LAFUENTE, R., & BILAL, M. Laccase-based biocatalytic systems application in sustainable degradation of pharmaceutically active contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 136803. 2024.

SINGH, R. P., YADAV, R., PANDEY, V., SINGH, A., SINGH, M., & SHANKER, K. Effect of biochar on soil microbial community, dissipation and uptake of chlorpyrifos and atrazine. *Biochar*. 2024; 6 (1): 1-17. 2024.

SINGH, S., KUMAR, V., GILL, J. P. K., DATTA, S., SINGH, S., DHAKA, V., ... & SINGH, J. Herbicide glyphosate: toxicity and microbial degradation. *International journal of environmental research and public health*, 17(20), 7519. 2020.

SOGOS, V., CARIA, P., PORCEDDA, C., MOSTALLINO, R., PIRAS, F., MILIANO, C., DE LUCA, M.A, & CASTELLI, M.P. Linhas de células neuronais humanas como ferramenta toxicológica in vitro para avaliação de novas substâncias psicoativas. *Revista Internacional de Ciências Moleculares*, 22(13), 6785. 2021.

SOUZA, M. T. D., SILVA, M. D. D., & CARVALHO, R. D. Revisão integrativa: o que é e como fazer. *Einstein (São Paulo)*, 8, 102-106. 2010.

SUN, C., XU, Y., HU, N., MA, J., SUN, S., CAO, W., KLOBUŇAR, G., HU, C., & ZHAO, Y. Avaliar a toxicidade da atrazina na microalga de água doce *Chlorella* sp. usando índices de sensibilidade indicados por parâmetros fotossintéticos. *Chemosphere*, 244, 125514. *quimiosfera*.2019.125514. 2020.

SURMEIER, D.J, OBESO, J.A, & HALLIDAY, G.M. Vulnerabilidade neuronal seletiva na doença de Parkinson. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(2), 101–113. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.178>. 2017.

TANG, M., SUN, Y., CAO, X., JIANG, X., GAO, X., & LI, X. Promotion mechanism of atrazine removal from soil microbial fuel cells by semiconductor minerals. *Sustainability*, 15(9), 7706. 2023.

THATHOLA, P., MELCHOR-MARTÍNEZ, E. M., ADHIKARI, P., MARTÍNEZ, S. A. H., PANDEY, A., & PARRA-SALDÍVAR, R. Laccase-mediated degradation of emerging contaminants: Unveiling a sustainable solution. *Environmental Science: Advances*, 3(11), 1500-1512. 2024.

TONG, Q., WANG, G., CHEN, M., CHEN, Y., & GUO, Y. Preparation and performance evaluation of novel magnetic porous carriers in fluidized bed bioreactor for wastewater treatment. *Biodegradation*, 32(6), 677-695. 2021.

TOLLER, N.; GUIMARÃES, E; BRAVO, C. Biodegradação do herbicida atrazina por *Saccharomyces cerevisia*. *Eng Sanit Ambiente*, v.26 n.4. julho/há 2021.

TOLLER, N. M. Biodegradação de atrazina estimulada por *Saccharomyces cerevisiae* e palha de milho. 2019. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Francisco Beltrão, 2019.

UTZIG, I. L. J; GRADE, C. V. C; BOROSKI, M. Estudo dos efeitos da atrazina sobre o desenvolvimento embrionário de aves. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 9, 2021.

VAZQUEZ-ARMENTA, F. J., VALDEZ-OLMOS, U. F., ARVIZU-FLORES, A. A., AYALA-ZAVALA, J. F., OCHOA-LEYVA, A., & LOPEZ-ZAVALA, A. A. Metal Ions and Chemical Modification Reagents Inhibit the Enzymatic Activity of Lecithin-Dependent Hemolysin from *Vibrio parahaemolyticus*. *Toxins*, 14(9), 609. 2022.

WANG, H., REN, W., XU, Y., WANG, X., MA, J., SUN, Y., & TENG, Y. Long-term herbicide residues affect soil multifunctionality and the soil microbial community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 283, 116783. 2024.

WANG, J., LI, X., YAN, J., & YANG, Y. Effects of heavy metal ions on microbial reductive dechlorination of 1, 2-dichloroethane and tetrachloroethene. *Frontiers in Marine Science*, 9, 881950. 2022.

WU, S., HE, H., LI, X., YANG, C., ZENG, G., WU, B., HE, S., & LU, L. Insights sobre a degradação da atrazina por ativação de persulfato usando um composto de ferro nanovalente zero e grafeno: desempenhos e mecanismos. *Chemical Engineering Journal*, 341, 126–136. 2018.

YAN, Z., ZHANG, W., PEI, Z., & JIAO, L. Start-Up and Bacterial Enrichment of an Anammox Reactor with Polyurethane Porous Material: Performance and Microbial Community. *Water*, 16(15), 2116. 2024.

YUE, W., WANG, X., ZHANG, J., BAO, J., & YAO, M. Construction of immobilized laccase system based on ZnO and degradation of mesotrione. *Toxics*, 12(6), 434. 2024.

ZHANG, J., LIANG, S., WANG, X., LU, Z., SUN, P., ZHANG, H., & SUN, F. Biodegradation of atrazine by the novel *Klebsiella variicola* strain FH-1. *BioMed Research International*, 2019(1), 4756579. 2019.

ZHAO, Q. et al. Enhanced stability and efficiency of enzyme-inorganic hybrid nanoflowers for organophosphate degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, p. 144312, 2025.

ZHAO, X., BAI, S., LI, C., YANG, J., & MA, F. Bioaugmentation of atrazine removal in constructed wetland: Performance, microbial dynamics, and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 289, 121618. 2019.

ZULFIQAR, N., ALI, M., INAM, F., KHAWAJA, S., RAZA, H. A., & KHAN, F. Synthesis of metal nanoparticles and their role in degradation of pesticides/herbicides: a review. *Discover Applied Sciences*, 7(6), 558. 2025.