

**BIORREMEDIAÇÃO E FITORREMEDIAÇÃO DO HERBICIDA 2,4-D E GLYPHOSATE –
REVISÃO DE LITERATURA**

**BIOREMEDIATION AND PHYTOREMEDIATION OF THE HERBICIDE 2,4-D AND
GLYPHOSATE – LITERATURE REVIEW**

**BIORREMEDIACIÓN Y FITORREMEDIACIÓN DE LOS HERBICIDAS 2,4-D Y
GLIFOSATO: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-184>

Data de submissão: 15/10/2025

Data de publicação: 15/11/2025

Francislene Couto da Costa

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

Endereço: Mato Grosso, Brasil

E-mail: francislene.costa@unemat.br

Maria Jaqueline de Lima Gonçalves

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

Endereço: Mato Grosso, Brasil

E-mail: maria.jaqueline@unemat.br

Krislly Emanuelly Moura Pimenta

Mestranda em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

Endereço: Mato Grosso, Brasil

E-mail: krislly.emanuelly@unemat.br

Miriam Hiroko Inoue

Doutora em Agronomia

Instituição: Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT)

Endereço: Mato Grosso, Brasil

E-mail: miriam@unemat.br

RESUMO

O aumento da produção agrícola intensificou a aplicação de herbicidas como o 2,4-D e glyphosate que são utilizados para o controle de plantas daninhas. Esses compostos químicos por mais que sejam eficazes afetam organismos não-alvo e podem causar a contaminação de solos e águas, além de desequilíbrios ecológicos. Assim, para mitigar esses impactos, técnicas sustentáveis como a biorremediação e a fitorremediação têm sido desenvolvidas, utilizando microrganismos e plantas capazes de degradar os herbicidas. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão de literatura das publicações que abordam sobre a biorremediação e fitorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate, por meio de microrganismos e plantas. A busca bibliográfica foi realizada em quatro bases de dados e foram selecionados trabalhos publicados entre os anos de 2019 a 2025 tanto em português como inglês. Foi possível evidenciar que a biorremediação e fitorremediação

se mostram técnicas promissoras para a degradação de diferentes herbicidas. A biorremediação realizada por microrganismos apresenta resultados expressivos em condições laboratoriais, porém ainda são necessários estudos de campo que confirmem sua eficiência em diferentes tipos de solo e níveis de contaminação. Já a fitorremediação depende da identificação de fatores que aumente a capacidade das plantas com a escolha de espécies adequadas e manejo de condições ambientais. Logo, ambas estratégias podem promover a recuperação de ambientes degradados e a mitigação dos impactos ambientais causados pelo uso excessivo de herbicidas.

Palavras-chave: Pesticidas. Degradação Biológica. Microrganismos. Plantas.

ABSTRACT

The increase in agricultural production has intensified the application of herbicides such as 2,4-D and glyphosate, which are used to control weeds. While these chemical compounds are effective, they affect non-target organisms and can cause soil and water contamination, as well as ecological imbalances. Therefore, to mitigate these impacts, sustainable techniques such as bioremediation and phytoremediation have been developed, using microorganisms and plants capable of degrading herbicides. Thus, this work aimed to conduct a literature review of publications addressing the bioremediation and phytoremediation of the herbicides 2,4-D and glyphosate using microorganisms and plants. The bibliographic search was conducted in four databases, and works published between 2019 and 2025, in both Portuguese and English, were selected. It was possible to show that bioremediation and phytoremediation are promising techniques for the degradation of different herbicides. Bioremediation using microorganisms shows significant results under laboratory conditions, but field studies are still needed to confirm its effectiveness in different soil types and contamination levels. Phytoremediation, on the other hand, depends on identifying factors that enhance the capacity of plants through the selection of appropriate species and the management of environmental conditions. Therefore, both strategies can promote the recovery of degraded environments and mitigate the environmental impacts caused by the excessive use of herbicides.

Keywords: Pesticides. Biological Degradation. Microorganisms. Plants.

RESUMEN

El aumento de la producción agrícola ha intensificado la aplicación de herbicidas como el 2,4-D y el glifosato, utilizados para el control de malezas. Si bien estos compuestos químicos son eficaces, afectan a organismos no objetivo y pueden causar contaminación del suelo y del agua, así como desequilibrios ecológicos. Por lo tanto, para mitigar estos impactos, se han desarrollado técnicas sostenibles como la biorremediación y la fitorremediación, que utilizan microorganismos y plantas capaces de degradar herbicidas. Así pues, este trabajo tuvo como objetivo realizar una revisión bibliográfica de las publicaciones que abordan la biorremediación y la fitorremediación de los herbicidas 2,4-D y glifosato mediante microorganismos y plantas. La búsqueda bibliográfica se realizó en cuatro bases de datos y se seleccionaron trabajos publicados entre 2019 y 2025, tanto en portugués como en inglés. Se pudo demostrar que la biorremediación y la fitorremediación son técnicas prometedoras para la degradación de diferentes herbicidas. La biorremediación mediante microorganismos muestra resultados significativos en condiciones de laboratorio, pero aún se requieren estudios de campo para confirmar su eficacia en diferentes tipos de suelo y niveles de contaminación. La fitorremediación, por otro lado, depende de la identificación de factores que potencien la capacidad de las plantas mediante la selección de especies apropiadas y el manejo de las condiciones ambientales. Por lo tanto, ambas estrategias pueden promover la recuperación de ambientes degradados y mitigar los impactos ambientales causados por el uso excesivo de herbicidas.

Palabras clave: Plaguicidas. Degradación Biológica. Microorganismos. Plantas.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial levou a produção de alimentos em largas escalas e com isso aplicação de pesticidas nas culturas agrícolas se tornou mais recorrente, já que esses compostos químicos são capazes de garantir a produtividade das culturas por diminuírem a ocorrência de pragas que causem perdas significativas (Nogueira *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2025). Dentre os pesticidas que são amplamente utilizados destacam-se os herbicidas que realizam o controle de plantas daninhas, porém esses compostos além de afetarem os organismos alvo prejudicam também os não-alvo de forma direta ou indireta (Guimarães *et al.*, 2022). A persistência dos herbicidas nos locais depende de fatores que envolvem processos de sorção que abrange a adsorção e absorção, transformação por meio de degradações químicas e físicas e transporte por meio da lixiviação ou deriva (Duke, 2020; Stoyanova *et al.*, 2023).

Os herbicidas 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) e glyphosate (N-(fosfonometil)glicina) são os mais empregados para o controle de plantas daninhas nos cultivos de soja, milho, algodão, arroz, cana-de-açúcar, café e trigo (Souza *et al.*, 2020). O 2,4-D é um herbicida seletivo que constitui o grupo dos fenoxiacéticos e seu modo de ação inclui o desequilíbrio hormonal que causa nas células da planta, resultando no crescimento desordenado dos tecidos que prejudicam seu desenvolvimento (Minozzi, 2022). Enquanto o glyphosate se trata de um herbicida não seletivo de amplo espectro que faz parte do grupo das glicinas e age inibindo enzimas como 5-enol-piruvil-shiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS) e 3-desoxi-D-arabino-heptulosonato-7-fosfato sintase (DAHPs), que produzem hormônios, aminoácidos e metabólitos que são fundamentais para o desenvolvimento das plantas (Feng; Soric; Outin, 2020; Patriarcheas; Momtareen; Gallagher, 2023; Souza *et al.*, 2022). Tanto o 2,4-D como o glyphosate são classificados como classe III de compostos químicos que são perigosos para o ambiente devido aos seus resíduos que permanecem após a aplicação e ocasionam impactos significativos ao ambiente (FAOSTAT, 2025; IBAMA, 2025). Esses herbicidas são capazes de contaminar o solo, rios e lençol freático, além de alterar a microbiota do solo e atingir organismos não-alvo acarretando um desequilíbrio ecológico (Tarla *et al.*, 2020).

Assim, o processo de degradação desses herbicidas é importante por amenizar a quantidade de resíduos no solo e pode ocorrer de acordo com fatores físicos como a fotodecomposição, por exemplo, que permite a degradação do herbicida pela quebra de suas moléculas pela energia luminosa (Barroso; Murata, 2021). Também podem ser degradados a partir de processos químicos que possibilitam a transformação do herbicida em outros compostos através de oxidação, redução e hidrólise, além de fatores biológicos como a degradação realizada por microrganismos que utilizam os herbicidas para obter energia e nutrientes (Mendes; Inoue; Tomisielo, 2022). Essas formas de degradação permitem

alteração completa do composto os transformando em CO₂, H₂O e sais minerais ou incompleta que resultam em produtos metabólicos da degradação que ainda podem apresentar toxicidade e persistir no ambiente. A partir desses processos foram desenvolvidas diversas técnicas que possibilitem a degradação desses herbicidas, principalmente no que diz respeito a processos biológicos de biodegradação.

Dentre elas, destaca-se a biorremediação que se trata de um conjunto de técnicas que permitem a diminuição ou remoção de compostos tóxicos presentes no ambiente por meio de organismos vivos e pode ser dividida em dois tipos, sendo eles “*ex situ*” quando o material contaminado é retirado do local e tratado em condições controladas e “*in situ*” quando o processo de descontaminação ocorre no próprio local contaminado (Oliveira, 2019; Silva; Moreira, 2024). A última pode utilizar microrganismos como fungos e bactérias para realizar a descontaminação de solos por produzirem enzimas que agem sobre as moléculas dos herbicidas reduzindo sua toxicidade e em alguns casos eliminando completamente o risco ambiental (Cruz, 2024). Outra opção é a fitorremediação que utiliza plantas para realizar a degradação de compostos químicos possibilitando a diminuição ou remoção desses contaminantes do ambiente (Lima *et al.*, 2024).

Assim, a realização de estudos que abordem sobre os organismos capazes de degradar herbicidas como 2,4-D e glyphosate auxiliam na elucidação dos mecanismos bioquímicos e genéticos envolvidos no processo de biorremediação e fitorremediação. Essas pesquisas não apenas ampliam o conhecimento básico sobre vias metabólicas e enzimas degradadoras, mas também apontam perspectivas para o desenvolvimento de tecnologias e protocolos de remediação “*in situ*” mais eficientes, contribuindo para a redução dos impactos ecológicos e riscos à saúde humana associados ao uso intensivo de herbicidas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão da literatura recente sobre a biorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate por meio de microrganismos (fungos e bactérias) e plantas capazes de degradar ou remover esses compostos do ambiente.

2 METODOLOGIA

A presente revisão foi conduzida com o intuito de compilar e selecionar trabalhos atuais sobre o uso de microrganismos e plantas na biorremediação e fitorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate. Logo, a busca bibliográfica foi realizada em bases de dados como Google Acadêmico, Scopus, Scielo e MDPI, e foram incluídos artigos científicos, dissertações e teses publicados entre os anos de 2019 a 2025 tanto em português como inglês. Foram utilizadas palavras-chaves como:

“Biorremediação microbiana 2,4-D”, “Biorremediação microbiana glyphosate”, “Fitorremediação 2,4-D” e “Fitorremediação glyphosate”.

Foram excluídos trabalhos incompletos, resumos expandidos ou simples e também trabalhos de conclusão de curso. Assim, foi realizada uma síntese das publicações dos últimos seis anos que avaliaram o potencial de gêneros ou espécies de fungos, bactérias e plantas na biorremediação e fitorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate que alcançaram resultados relevantes e com isso foi possível destacar as abordagens que estão consolidadas nessa área e outras que necessitam de mais estudos para o aprimoramento das técnicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 BIORREMEDIAÇÃO FÚNGICA

A aplicação de fungos como agentes na biorremediação apresenta vantagens como baixo custo, sustentabilidade e possibilidade de aproveitamento da biomassa residual para outros fins, como tratamento secundário de efluentes e bioassorção de metais pesados (Bomfeti; Santos; Santos, 2025). Os fungos são capazes de produzir enzimas extracelulares como lacases, peroxidases (lignina peroxidase e manganês peroxidase), amilases, xilanases e celulases, que atuam na degradação de estruturas aromáticas e organofosforadas presentes nos herbicidas (Singh *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2020).

Nos processos de biorremediação, os pesticidas são transformados em produtos de degradação como CO₂ e água ou são completamente mineralizados pelos microrganismos, que utilizam os compostos poluentes como nutrientes para suas reações metabólicas. Sendo os fungos filamentosos, como os do solo, principalmente oriundos de locais com histórico de poluição agrícola, assim como fungos entomopatogênicos são capazes de transformar moléculas de herbicidas, assim como de outros pesticidas (Akhtar; Amin-ul Mannan, 2020; Orji *et al.*, 2022; Raffa; Chiampo, 2021; Spinelli *et al.*, 2021; Swathy *et al.*, 2024).

A biorremediação por fungos representa uma abordagem promissora na degradação de compostos xenobióticos como os herbicidas 2,4-D e glyphosate. Diversos gêneros fúngicos têm sido estudados por sua capacidade de degradar herbicidas, com destaque para *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Trichoderma* spp., *Fusarium* spp., *Phanerochaete chrysosporium*. Cada vez mais pesquisas vêm sendo realizadas sobre a biorremediação de 2,4-D e glyphosate com fungos, para mitigar os impactos destes no ambiente (Tabela 1).

Tabela 1. Estudos recentes sobre fungos com potencial de biorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate.

Herbicida	Fungos	Degradação	Referências
2,4-D	<i>Lentinus crinitus</i> ; <i>Aspergillus oryzae</i> ; <i>Aspergillus versicolor</i> e <i>Rhizopus arrhizus</i> .	Altas porcentagens de degradação; Detecção da formação do metabólito secundário 2,4-DCP.	Gul; Silah, 2025; Serbent <i>et al.</i> , 2020; Magnoli <i>et al.</i> , 2025.
Glyphosate	<i>Purpureocillium lilacinum</i> ; <i>Phanerochaete australis</i> ; <i>Aspergillus terréus</i> ; <i>Candida tropicalis</i> .	Apresentaram tolerância ao herbicida; Altas porcentagem de degradação; Uso da molécula de herbicida como fonte energética.	Souza <i>et al.</i> , 2022; Orji <i>et al.</i> , 2022; Spinelli <i>et al.</i> , 2021; Stoyanova <i>et al.</i> , 2023.

Fonte: Autoras, 2025.

Por exemplo, Nguyen *et al.*, (2022), em ensaios com herbicida 2,4-D, identificaram dois isolados do filo Ascomycota, com potencial de degradar diferentes concentrações do herbicida, assim como seu principal metabólito secundário. Enquanto Bravim *et al.* (2021) identificaram que o isolado *Fusarium verticillioides*, apresentou bom crescimento em meio de cultura suplementada com glyphosate, indicando o potencial dessa espécie em descontaminar ambientes afetados por esse herbicida. Já Sousa *et al.*, (2022), em ensaios com herbicida glyphosate, determinaram a tolerância de alguns fungos isolados de uma unidade de conservação do Cerrado brasileiro, bem como o potencial de degradar tanto essa como outras moléculas xenobióticas, destacando o papel da conservação na diversidade de fungos com potencial biotecnológico.

Um papel fundamental nos mecanismos de biorremediação de herbicidas e outros xenobióticos é desempenhado por enzimas, como as oxigenases, que influenciam e catalisam diversas reações bioquímicas. As propriedades degradativas dos microrganismos podem ser totalmente exploradas usando os avanços em engenharia genética e biotecnologia, abrindo caminho para estratégias de biorremediação mais eficazes, novas tecnologias e novas aplicações (Kumar *et al.*, 2021; Raffa; Chiampo, 2021; Ramírez *et al.*, 2023). As enzimas fúngicas oxidam o substrato, removendo elétrons e geralmente introduzindo oxigênio à molécula. Essa oxidação pode tornar o composto mais reativo e suscetível a outras transformações que o levam à degradação completa. Por exemplo, a lacase oxida fenólicos, facilitando sua quebra ou precipitação de forma que fiquem menos tóxicos no ambiente (Rathore *et al.*, 2022; Sharma; Dangi; Shukla, 2018).

As lacases são enzimas que oxidam fenóis e substratos aromáticos por transferência de elétrons para o centro de cobre, gerando radicais que podem reagir com água ou se recombinar com mediadores, tornando-as promissoras na degradação de herbicidas (Bhatt *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2023; Vaithyanathan; Vaidyanathan; Cabana, 2021). As enzimas peroxidases, como a lignina peroxidase e o manganês peroxidase, na presença de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), agem como oxidantes difusíveis,

oxidando ligações aromáticas recalcitrantes, degradando ligações de carbono e clivando anéis aromáticos (Dinakarkumar *et al.*, 2024; Dhagat; Jujjavarapu, 2021; Grgas *et al.*, 2023; Kumar; Chandra, 2020; Vaksmaa *et al.*, 2023).

Os macrofungos, especialmente os fungos ligninolíticos, apresentam a capacidade de tolerar a variados ambientes contaminados com diversas concentrações de pesticidas, onde até mesmo a degradação de alguns compostos tenha sido observada (Barros do Nascimento *et al.*, 2025; Echezonachi, 2022; Elias; Inoue; Souza, 2025; Nguyen *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2022). Além deles, os fungos endofíticos também possuem potencial de tolerar a ambientes que houve a aplicação de herbicidas, sendo uma fonte potencial de biorremediação desses poluentes (Ahmed *et al.*, 2025; Lonkar; Bodade, 2021; Yadav *et al.*, 2022). Segundo Silva (2024), cepas de *Aspergillus niger* e *Epicoccum* sp. mostraram-se eficiente na biorremediação de compostos fenólicos e corantes azoicos, alcançando taxas de remoção superiores a 98% em processos realizados sob métodos realizados. Além disso, alterações estruturais dos poluentes foram comprovadas por técnicas analíticas, como a espectroscopia no infravermelho, evidenciando a atuação direta das enzimas fúngicas durante o processo.

Contudo, os estudos acerca da biorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate, se concentram em análises em laboratório, o que pode ser considerado ponto de partida para pesquisas do tipo, para que possa ser aplicado em campo futuramente (Ayilara; Babalola, 2023). Além disso, há a biorremediação com outros microrganismos, especialmente bactérias, responsáveis por grande parte dos estudos conduzidos sobre essa técnica sustentável de descontaminação. Dessa forma, a biorremediação por fungos se consolida como uma tecnologia ambientalmente adequada e eficiente para a manipulação de herbicidas, destacando-se como alternativa sustentável para a recuperação de áreas contaminadas. A investigação contínua das capacidades enzimáticas e adaptação de linhagens fúngicas contribuirá para aprimorar as estratégias de remediação ambiental.

3.2 BIORREMEDIAÇÃO BACTERIANA

A biorremediação bacteriana tem mostrado grande potencial na descontaminação de solos, com microrganismos degradando compostos tóxicos e transformando-os em produtos menos prejudiciais (Singh *et al.*, 2024; Thirumalaivasan *et al.*, 2024). Com o aumento da contaminação por herbicidas, essa abordagem surge como uma alternativa sustentável e eficaz para a recuperação ambiental. As bactérias se adaptam rapidamente às mudanças ambientais, como pH, temperatura e disponibilidade de nutrientes (Khlaif; Al Hassany, 2024; Pereira; Hemamali, 2021).

A biodegradação ocorre quando as bactérias utilizam enzimas específicas para decompõr poluentes, como glyphosate e 2,4-D, gerando metabólitos como AMPA (ácido aminometilfosfônico) e 2,4-diclorofenol. A atividade enzimática e a interação bacteriana com o ambiente são essenciais para a eficiência do processo (Singh *et al.*, 2024; Thirumalaivasan *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024). Embora eficaz, a biorremediação enfrenta desafios como a toxicidade de alguns compostos e condições ambientais variáveis, que podem afetar a eficácia dos microrganismos. Fatores como a disponibilidade de herbicidas e interações microbianas com o solo são cruciais para o sucesso do processo (Ayilara; Babalola, 2023; Romantschuk *et al.*, 2023).

Diversas pesquisas têm investigado a capacidade de cepas bacterianas na degradação de glyphosate e 2,4-D. Espécies como *Achromobacter sp.* e *Cupriavidus necator* demonstrando grande capacidade de biodegradação desses compostos. A eficiência depende de condições ambientais, como temperatura e pH, que influenciam a atividade metabólica das bactérias (Ermakova *et al.*, 2010; Muhammad *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2017). As Tabelas 2 e 3 resumem estudos experimentais sobre a degradação de 2,4-D e glyphosate, destacando a eficiência de diferentes cepas bacterianas em remover poluentes do solo e os metabólitos gerados.

Tabela 2: Biorremediação bacteriana do herbicida 2,4-diclorofenoxyacético.

Gênero/ Espécie	Condições Experimentais	Degradação	Metabólitos	Autores/Ano
<i>Cupriavidus gilardii</i> T-1	Solo contaminado com 2,4-D, incubação a 30°C, pH 7.0	100% (10 mg/L), 98% (10 mg/kg) em 36h	2,4-Diclorofenol, 3,5-diclorocatecol	Wu <i>et al.</i> , 2017
<i>Cupriavidus oxalaticus</i> X32	Solo com 500 mg/L de 2,4-D, 30°C, pH 6.5	100% (500 mg/L), 75% (1000 mg/L), 20% (3000 mg/L) em 3 dias	2,4-Diclorofenol	Xiang <i>et al.</i> , 2020
<i>Cupriavidus necator</i> JMP134	Microcosmos com plantas sensíveis e resistentes, 2,4-D (0.5 mg/kg)	85% em 4 dias, 100% em 7 dias	2,4-DCP, 3,5-DCC, cis-cis muconato, CO ₂	Carles <i>et al.</i> , 2021
<i>Cupriavidus campinensis</i>	Solo de arroz, 0,72 g/L de 2,4-D, 30°C por 96h	94,69% (6 dias)	Não especificado	Muhammad <i>et al.</i> , 2023
<i>Achromobacter xylosoxidans</i>	Solo agrícola, 0,72 g/L de 2,4-D, 30°C por 96h	95,38% (76h)	Não especificado	Muhammad <i>et al.</i> , 2024

<i>Cupriavidus sp.</i> DSPFs	Solo agrícola, Vigna radiata, 2,4-D até 3000 ppm	95% (4 dias)	2,4-DCP, 3,5-DCC, 2,4-dicloro-cis, cis-muconato	Papade <i>et al.</i> , 2025
---------------------------------	---	--------------	---	-----------------------------

Fonte: Autoras, 2025.

Tabela 3 – Biorremediação bacteriana do herbicida glyphosate.

Gênero/ Espécie	Condições Experimentais	Degradação	Metabólitos	Autores /Ano
<i>Achromobacter sp.</i> , <i>Ochrobactrum anthropi</i>	Solo e campo com glyphosate (laboratório)	75,2% (<i>Achromobacter</i>) no campo; 61,5% (<i>Ochrobactrum</i>) no campo	AMPA	Ermakova <i>et al.</i> , 2010
<i>Acinetobacter</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Agrobacterium</i> , <i>Ochrobactrum</i> , <i>Pantoea</i> , <i>Pseudomonas</i>	Solo com glyphosate (GBH, GLY, AMPA)	Até 56%	AMPA	Masotti <i>et al.</i> , 2021
<i>Rhodococcus soli</i>	Solo com 500 mg/L de glyphosate	42,7% (7 dias)	Sarcosina, AMPA	Nguyen <i>et al.</i> , 2022
<i>Serratia liquefaciens</i> , <i>Klebsiella variicola</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterobacter ludwigii</i>	Solo de Punjab, Paquistão com glyphosate	Até 98% (28 dias)	AMPA	Mohy-Ud-Din <i>et al.</i> , 2023
<i>Serratia liquefaciens</i> , <i>Klebsiella variicola</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterobacter ludwigii</i>	Solo e líquido incubados a 28±2°C por 14 dias	95-98 mg/kg ⁻¹ no solo	AMPA	Mohy-Ud-Din <i>et al.</i> , 2024
<i>Afipia</i> , <i>Dokdonella</i> , <i>Cohnella</i>	Solo com glyphosate em Yunnan, China	400 mg/L ⁻¹ (7 dias)	AMPA (Ácido Aminometilfosfônico)	LI <i>et al.</i> , 2024

<i>Burkholderia cenocepacia</i>	Solo agrícola com 2000 mg/L de glyphosate	50 mg/L ⁻¹ AMPA (8h)	AMPA	Díaz-Soto <i>et al.</i> , 2024
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	Solo agrícola com 0,5 g/L de glyphosate	40% (5 dias)	AMPA, Sarcosina, Glicina	Bhatt <i>et al.</i> , 2025

Fonte: Autoras, 2025.

Os resultados experimentais apresentados nas Tabelas 2 e 3 mostram que diversas bactérias têm demonstrado grande potencial na degradação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate. A capacidade de degradação variou entre as espécies bacterianas, com destaque para as cepas *Cupriavidus gilardii* T-1 e *Cupriavidus necator* JMP134, que conseguiram degradar 100% do 2,4-D em apenas 10 horas (Wu *et al.*, 2017) e 98% do glyphosate em 28 dias (Mohy-Ud-Din *et al.*, 2023).

A temperatura e o pH desempenham um papel crucial na eficácia da biorremediação. As cepas bacterianas como *Achromobacter sp.* e *Serratia liquefaciens* mostraram eficiência elevada em diferentes condições ambientais, com a degradação do glyphosate chegando a 98% em alguns casos (Mohy-Ud-Din *et al.*, 2023). Além disso, fatores como a disponibilidade de nutrientes e a concentração do poluente influenciam diretamente o sucesso da biodegradação (Masotti *et al.*, 2021).

Os metabólitos resultantes da biotransformação de glyphosate incluem o AMPA (ácido aminometilfosfônico), enquanto o 2,4-D gera 2,4-diclorofenol e compostos derivados. Esses achados confirmam a capacidade das bactérias de transformar substâncias tóxicas em metabólitos menos prejudiciais, o que é um passo crucial para a recuperação ambiental de solos contaminados por herbicidas (Nguyen *et al.*, 2022).

Apesar da eficiência observada, a variabilidade ambiental continua sendo um desafio significativo. A presença de compostos tóxicos, como glyphosate e 2,4-D, e as flutuações nas condições ambientais, como o pH e a temperatura, podem afetar a eficácia dos microrganismos. No entanto, a diversidade microbiana, observada em diversos estudos, parece ser um fator crucial para o sucesso da biorremediação em condições naturais (Singh *et al.*, 2024; Thirumalaivasan *et al.*, 2024). Portanto, os dados apresentados reforçam que a aplicação de cepas bacterianas específicas, aliada ao controle de fatores ambientais, pode otimizar a biorremediação de solos contaminados, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e seguras.

3.3 FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação consiste na utilização de plantas para remover, degradar ou estabilizar compostos tóxicos presentes em solo ou água como metais pesados, herbicidas e hidrocarbonetos

(Lima *et al.*, 2024). A escolha das plantas ideais para uso na fitorremediação baseia-se em características como crescimento rápido, alta produção de biomassa, ampla adaptabilidade a ambientes contaminados, sistema radicular profundo e bem desenvolvido, além de elevados níveis de enzimas capazes de degradar xenobióticos (Del Buono *et al.*, 2020; Tarla *et al.*, 2020). Também é essencial que a espécie seja competitiva em relação a outras plantas, apresente alta capacidade de acumular os contaminantes-alvo e seja eficiente na translocação dessas substâncias das raízes para as demais estruturas da planta (López-Chávez *et al.*, 2021). Assim, o processo de fitorremediação pode ser categorizado em alguns tipos como a fitodegradação, fitoextração, fitoestabilização, fitovolatilização e fitoestabilização, que são definidos de acordo com os diferentes mecanismos utilizados.

No caso da degradação de herbicidas, um dos processos mais utilizados é a fitodegradação, em que as plantas absorvem e metabolizam compostos tóxicos, transformando-os em substâncias menos nocivas por meio da ação de enzimas (lacases e peroxidases) e esse mecanismo promove a degradação, estabilização ou volatilização dos compostos (Dias; Borges, 2024). Outro processo comumente aplicado é a fitoextração que consiste na absorção do composto químico e seu acúmulo nos tecidos aéreos das plantas, podendo ser dividida em contínua que se dá pela utilização de plantas que absorvem e acumulam naturalmente grandes quantidades de compostos tóxicos e induzida que ocorre quando são adicionados agentes quelantes que solubilizam os compostos presentes no solo tornando-os mais biodisponíveis para absorção pelas raízes (Nedjimi, 2021).

Assim, alguns estudos abordam sobre a fitorremediação do herbicida glyphosate, como o realizado por López-Chávez *et al.* (2021), que avaliaram a tolerância de diferentes espécies vegetais nativas frente ao herbicida e sua capacidade de degradá-lo. Entre as espécies avaliadas, *Panicum maximum* apresentou a maior eficiência na remoção do herbicida (87%), seguida por *Typha domingensis* (79%) e *Heliconia latispatha* (66%). Da mesma forma, Jacklin, Brink e Waal (2020) verificaram que espécies vegetais nativas, como *Bolboschoenus maritimus*, *Aristea capitata* e *Typha capensis*, demonstram maior eficiência na fitorremediação do glyphosate e outros compostos químicos quando comparadas a espécies exóticas, destacando a importância de priorizar a aplicação de plantas nativas, que mantêm o desempenho de biorremediação e favorecem a biodiversidade local. Outros trabalhos, como o de Gao *et al.* (2023), apontam que determinadas espécies, como *Vulpia myuros*, são mais eficientes em menores concentrações do herbicida, já que absorvem, translocam e degradam o composto em níveis não tóxicos (Panfili; Bartucca; Del Buono, 2019).

Por outro lado, a fitorremediação do herbicida 2,4-D ainda é pouco explorada em comparação a do glyphosate, mas algumas pesquisas que vem sendo desenvolvidas demonstram resultados promissores. Por exemplo, Ceylan, Moharramzadeh e Atici (2021) avaliaram a capacidade de mudas

de *Datura stramonium* em realizar a fitorremediação do herbicida em ambientes úmidos sob diferentes concentrações, observando que a espécie tolerou a exposição e degradou entre 52% e 78% do composto em todas as doses testadas. Em outro estudo, Flafel *et al.* (2024) analisaram a eficiência da remoção do 2,4-D por meio da integração entre *Eichhornia crassipes* e biochar, comparando com o desempenho da planta isoladamente. Essa combinação resultou em uma remoção de 98,7% do herbicida e promoveu melhor desenvolvimento morfológico da planta, evidenciando que o uso do biochar potencializa a fitorremediação e reduz os efeitos tóxicos do composto. Desse modo, a escassez de estudos voltados especificamente à fitodegradação do herbicida 2,4-D pode ser atribuída a diversos fatores químicos e biológicos, já que ele é um herbicida que apresenta uma elevada toxicidade fazendo com que poucas plantas possuam a capacidade de metabolizá-lo de forma eficiente (Torra *et al.*, 2024).

Diante disso, é possível evidenciar que as pesquisas em relação à fitorremediação dos herbicidas glyphosate e 2,4-D apresentam resultados interessantes, mas alguns aspectos ainda dificultam avanços técnicos e aplicações práticas. A potencialização dessa técnica pode ser realizada por meio de algumas estratégias, como a utilização de microrganismos endofíticos e rizosféricos por serem capazes de degradar o herbicida e reduzir sua fitotoxicidade, contribuindo significativamente para o processo de fitorremediação (Panfili; Bartucca; Del Buono, 2019). A manipulação e o estudo desses microrganismos associados às plantas podem aprofundar a compreensão das interações simbióticas entre ambos, permitindo otimizar o sinergismo entre planta e microrganismo (Khatoon; Orozco-Mosqueda; Santoyo, 2024). Além disso, a engenharia genética pode auxiliar no desenvolvimento de plantas melhoradas geneticamente que sejam capazes de absorver e tolerar os herbicidas, além de conferir maior eficiência na metabolização e capacidade de acumular grandes concentrações desses compostos (Montreemuk; Stewart; Prapagdee, 2024). Também é fundamental fornecer condições ambientais favoráveis para que a fitorremediação ocorra de forma eficiente e isso pode ser alcançado por meio da aplicação de técnicas de manejo que melhorem as propriedades físico-químicas do solo, como a incorporação de matéria orgânica, o uso de aditivos ou biochar e a adição de agentes quelantes. Essas práticas contribuem para melhorar a qualidade do solo, aumentar sua capacidade de retenção de água e nutrientes e reduzir a concentração de herbicidas presentes no ambiente

Apesar dos avanços alcançados na fitorremediação de herbicidas, ainda existem lacunas significativas que limitam a aplicação prática dessa tecnologia, já que a maioria dos trabalhos se concentra em condições controladas, o que dificulta a extração dos resultados para ambientes naturais, onde fatores como variações climáticas, interação com microrganismos e composição do solo podem influenciar a eficiência do processo. Dessa forma, percebe-se que alguns elementos podem ser

empregados para aprimorar a técnica de fitorremediação por meio de estudos que já foram realizados possibilitando que novas pesquisas explorem a temática e desenvolvam novas vertentes com abordagens que tornem a técnica de fitorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate mais eficaz.

4 CONCLUSÃO

A presente revisão demonstrou que tanto microrganismos quanto plantas podem ser utilizados nos processos de biorremediação e fitorremediação dos herbicidas 2,4-D e glyphosate, pois possuem mecanismos capazes de degradar esses compostos. A biorremediação com fungos filamentosos e basidiomicetos têm sido amplamente estudada em condições laboratoriais, embora ainda sejam necessárias pesquisas em campo para avaliar seu desempenho em ambientes naturais e sob condições reais de contaminação. Paralelamente, a fitorremediação se destaca como uma técnica promissora para a degradação de herbicidas, apesar de demandar mais estudos voltados à identificação de fatores que potencializam a eficiência das plantas nesse processo. Assim, conclui-se que ambas as abordagens representam alternativas sustentáveis e eficazes para a remoção de herbicidas, contribuindo para a recuperação de ambientes contaminados e a redução dos impactos ambientais e à saúde humana.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, N.; AMIN-UL MANNAN, M. Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. **Biotechnology Reports**, v. 26, p. 1-10, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X19307003>.
- AYILARA, M. S.; BABALOLA, O. O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1-15, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2023.1183691/full>.
- BARROSO, A. A. M.; MURATA, A. T. **Matologia: estudos sobre plantas daninhas**. 1 ed. Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2021. Disponível em: https://www.matologia.com/_files/ugd/1a54d2_3829fc6f7e9145f8bbdc7a2eecaf4d3.pdf#page=253.
- BHATT, P. et al. Bioremediation potential of laccase for catalysis of glyphosate, isoproturon, lignin, and parathion: Molecular docking, dynamics, and simulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 443, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422021136>.
- BOMFETI, C. A. et al. **Biorremediação de áreas contaminadas com emprego de fungos do gênero Pleurotus**. nº 1 (Série E-books SolloAgro). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786587391809>.
- CARLES, L. et al. Potential of preventive bioremediation to reduce environmental contamination by pesticides in an agricultural context: a case study with the herbicide 2, 4-D. **Journal of Hazardous Materials**, v. 416, p. 125740, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125740>.
- CHEN, S. F. et al. Microorganism-driven 2,4-D biodegradation current status and emerging opportunities. **Molecules**, v. 29, n. 16, p. 3869, 2024. Disponível em: [10.3390/molecules29163869](https://doi.org/10.3390/molecules29163869).
- CRUZ, P. C. **Aplicação de *Candida intermedia* na remoção de glifosato em soluções aquosas**. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Curitiba, 2024. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/37213>.
- DHAGAT, S.; JUJJAVARAPU, S. E. Utility of lignin-modifying enzymes: a green technology for organic compound mycdegradation. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 97, p. 343-358, 2022. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.6807>.
- DINAKARKUMAR, Y. et al. Fungal bioremediation: an overview of the mechanisms, applications and future perspectives. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**, v. 6, p. 293-302, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590182624000237>.
- DÍAZ-SOTO, J. A. et al. Glyphosate resistance and biodegradation by *Burkholderia cenocepacia* CEIB S5-2. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 31, n. 25, p. 37480-37495, 2024. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-33772-2>.
- DEL BUONO, D. et al. Phytoremediation and detoxification of xenobiotics in plants: herbicide-safeners as a tool to improve plant efficiency in the remediation of polluted environments. A mini-

review. **International journal of phytoremediation**, v. 22, n. 8, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15226514.2019.1710817>.

DONG, C. *et al.* Laccase: a potential biocatalyst for pollutant degradation. **Environmental Pollution**, v. 319, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123000015>.

DUKE, S. O. Glyphosate: environmental fate and impact. **Weed Science**, v. 68, n. 3, p. 201-207, 2020. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/glyphosate-environmental-fate-and-impact/85C5628F98E45060AE0B7046F11361E2>.

ECHEZONACHI, S. O. The role of white rot fungi in bioremediation. In: **Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation**. Elsevier, 2022. p. 305-320. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323904520000347>.

ELIAS, R. V.; INOUE, M. H.; SOUZA, H. M. L. Macrofungi with potential for bioremediation of the herbicide atrazine. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 97, n. 4, p. 1-12, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/LLRjb93bHbst5kvGvgzmSS/?lang=en>.

ERMAKOVA, I. T. *et al.* Bioremediation of glyphosate-contaminated soils. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 88, p. 585-594, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-010-2775-0>.

FENG, D.; SORIC, A.; BOUTIN, O. Treatment technologies and degradation pathways of glyphosate: A critical review. **Science of The Total Environment**, v. 742, p. 140559, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972034081X>.

GRGAS, D. *et al.* The bacterial degradation of lignin - a review. **Water**, v. 15, n. 7, p. 1-17, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/15/7/1272?utm_campaign=releaseissue_waterutm_medium=emailutm_source=releaseissueutm_term=titlelink92.

KHATOON, Z.; OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; SANTOYO, G. Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: A review. **Microorganisms**, v. 12, n. 10, p. 1-20, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/12/10/1945>.

KHLAIF, B. M.; AL HASSANY, J. S. Bioremediation to improve the efficiency of recovering soil removed from agricultural use areas. **Nativa**, v. 12, n. 3, p. 559-566, 2024. Disponível em: <https://openurl.ebsco.com/openurl?sid=ebsco:plink:scholar&id=ebsco:gcd:181715440&crl=c>.

KORKMAZ, V. *et al.* The bioremediation of glyphosate in soil media by some newly isolated bacteria: The COD, TOC removal efficiency and mortality assessment for *Daphnia magna*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 221, p. 101535, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101535>.

KUMAR, A.; CHANDRA, R. Ligninolytic enzymes and its mechanisms for degradation of lignocellulosic waste in environment. **Heliyon**, v. 6, n. 2, p. 1-18, 2020. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(20\)30015-3](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)30015-3).

KUMAR, A. *et al.* Chlorpyrifos degradation using binary fungal strains isolated from industrial waste soil. **Biología**, v. 76 n. 10, p. 3071–3080, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11756-021-00816-8>.

LIMA, K. F. S. *et al.* Fitorremediação de solo contaminado por herbicida utilizando espécies florestais nativas. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 3, p. 1-16, 2024. Disponível em: <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/3711>.

LONKAR, K., BODADE, R. Potential role of endophytes in weeds and herbicide tolerance in plants. In: MOHAMED, H. I., EL-BELTAGI, H. E. S.; ABD-ELSALAM, K. A. **Plant Growth-Promoting Microbes for Sustainable Biotic and Abiotic Stress Management**. Springer, p. 227-250, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-66587-6_9.

LÓPEZ-CHÁVEZ, M. Y *et al.* Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. **Environmental Advances**, v. 8, p. 1-10, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765722000394>.

MAGNOLI, K. *et al.* Biodegradação fúngica de herbicidas clorados: uma visão geral com ênfase em 2,4-D na Argentina. **Biodegradation**, v. 34, p. 199-214, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10532-023-10022-9>.

MAGNOLI, K. *et al.* *Aspergillus oryzae* Pellets as a Biotechnological Tool to Remove 2,4-D. **Agriculture**, v. 15, n. 1795, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15171795>.

MAHALLE, S. *et al.* Emerging microbial remediation methods for rejuvenation of pesticide-contaminated sites. **Trends in Environmental Microbiology**, v. 1 p. 100026, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.temcr.2025.100026>.

MENDES, K. F.; INOUE, M. H.; TOMISIELO, V. L. **Herbicidas no ambiente: comportamento e destino**. 1 ed. Editora UFV, 2022.

MINOZZI, G. B. **Eficácia, absorção e translocação de glifosato e 2,4-D em *Spermacoce verticillata* (L.)**. 80 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-16052022-105231/en.php>.

MOHY-UD-DIN, W. *et al.* Isolated bacterial strains efficiently degrade glyphosate under different environmental conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 56, n. 2, p. 765-774, 2024. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2024-2\(28\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2024-2(28)).

MOHY-U-DIN, W. *et al.* Unlocking the potential of glyphosate-resistant bacterial strains in biodegradation and maize growth. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1285566, 2023. Disponível em: [10.3389/fmicb.2023.1285566](https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285566).

MONTREEMUK, J.; STEWART, T. N.; PRAPAGDEE, B. Bacterial-assisted phytoremediation of heavy metals: Concepts, current knowledge, and future directions. **Environmental Technology & Innovation**, v. 33, p. 1-15, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186423004844>.

MUHAMMAD, J. B. et al. *Achromobacter xylosoxidans* bacteria isolated from contaminated agricultural environment for a sustainable 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide degradation: An experimental study. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, p. 100604, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100604>.

MUHAMMAD, J. B. et al. Biodegradation potential of 2,4 dichlorophenoxyacetic acid by *Cupriavidus campinensis* isolated from rice farm cultivated soil. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 100434, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100434>.

NASCIMENTO, A. C. B. et al. Exploring fungal biodegradation pathways of 2,4-D: enzymatic mechanisms, synergistic actions, and environmental applications. **ACS Omega**, v. 10, n. 35, p. 39398-39414, 2025. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.5c05161>.

NEDJIMI, B. Fitorremediação: uma tecnologia ambiental sustentável para descontaminação de metais pesados. **SN Applied Sciences**, v. 3, n. 286, p. 1-19, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-021-04301-4>.

NGUYEN, T. L. A. et al. Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) and 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T) by fungi originating from Vietnam. **Biodegradation**, v. 33, n. 3, p. 301-316, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10532-022-09982-1>.

NOGUERA, O. M. N. et al. Tolerância de microrganismos eucariotos ao herbicida glifosato. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 42, n. 1, p. 103-112, 2021. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/seminabio/article/view/41979/28925>.

OLIVEIRA, C. G. et al. Production of indole-3-acetic acid and degradation of 2,4-d by yeasts isolated from pollinating insects. **Microorganisms**, v. 13, n. 7, p. 1-13, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/13/7/1492>.

ORJI, M. U. et al. Bioremediation of glyphosate polluted soil using fungal species. **International Journal of Trend in Scientific Research and Development**, v. 6, n. 7, p. 726-732, 2022. Disponível em: <http://eprints.umsida.ac.id/10830/>.

PAPADE, Sandesh E. et al. Degradation of 2, 4-D by plant growth-promoting *Cupriavidus* sp. DSPFs: role in mitigating herbicide toxicity in soil and enhancing crop production. **Microbiology Spectrum**, p. e00560-25, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00560-25>.

PATEL, A. K. et al. Organic wastes bioremediation and its changing prospects. **Science of the Total Environment**, v. 824, p. 153889, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153889>.

PATRIARCHEAS, D.; MOMTAREEN, T.; GALLAGHER, J. E. G. Yeast of Eden: microbial resistance to glyphosate from a yeast perspective. **Springer**, v. 69, n. 4, p. 203-212, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00294-023-01272-4>.

PERERA, I. C.; HEMAMALI, E. H. Genetically modified organisms for bioremediation: current research and advancements. **Bioremediation of environmental pollutants: emerging trends and strategies**, p. 163-186, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8_7.

RAFFA, C. M.; CHIAMPO, F. Bioremediation of agricultural soils polluted with pesticides: a review. **Bioengineering**, v. 8, n. 7, p. 1-29, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5354/8/7/92>.

RAMÍREZ, J. R. G. et al. Microbiology and biochemistry of pesticides biodegradation. **International journal of molecular sciences**, v. 24, n. 21, p. 1-47, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/21/15969>.

RATHORE, S. et al. An innovative approach of bioremediation in enzymatic degradation of xenobiotics. **Biotechnology & genetic engineering reviews**, v. 38, n. 1, p. 1-32, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02648725.2022.2027628>.

ROMANTSCHUK, M. et al. Bioremediation of contaminated soil and groundwater by in situ biostimulation. **Frontiers in microbiology**, v. 14, p. 1258148, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1258148/full>.

SERBENT, M. P. et al. Growth, laccase activity and role in 2,4-D degradation of *Lentinus crinitus* (L.) Fr. in a liquid medium. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 50, n. 7, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S187881812300083X>.

SILVA, L. F. N. **Biorremediação de poluentes orgânicos em meio aquoso utilizando fungos filamentosos**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2024. Disponível em: <https://www2.uesb.br/ppg/ppgquimica/wp-content/uploads/2025/08/Luiz-Filipe-Nonato-Silva>.

SILVA, J. P. P. et al. Fitorremediation of contaminated soil with 2, 4-D+ picloram in Eastern Amazonia. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/85207072777?origin=resultslist>.

SILVA, J. V.; MOREIRA, J. S. C. Análise enzimática de isolados de basidiomicetos e potencial de biorremediação do herbicida 2,4-D (ácido 2,4-Diclorofenoxyacético). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 88-101, 2024. Disponível em: <https://revistabrasileirademedioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/1565>.

SHARMA, B.; DANGI, A. K.; SHUKLA, P. Contemporary enzyme based technologies for bioremediation: a review. **Journal of environmental management**, v. 210, p. 10–22, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030147971731263X>.

SINGH, N. et al. Microbially derived surfactants: an ecofriendly, innovative, and effective approach for managing environmental contaminants. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 12, p. 1398210, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2024.1398210/full>.

SOUZA, R. M. et al. Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: a review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 135, p. 22-37, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019318683>.

SOUZA, F. S. et al. Isolamento e seleção de fungos tolerantes ao herbicida **Glyphosate**. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24782>.

SPINELLI, V. et al. Glyphosate-eating fungi: study on fungal saprotrophic strains' ability to tolerate and utilise glyphosate as a nutritional source and on the ability of *Purpureocillium lilacinum* to degrade it. **Microorganisms**, v. 9, n. 11, p. 1-21, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/9/11/2179>.

STOYANOVA, K. et al. Biodegradation and Utilization of the Pesticides Glyphosate and Carbofuran by Two Yeast Strains. **Processes**, v. 11, n. 3343, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11123343>.

SWATHY, K. et al. Biodegradation of pesticide in agricultural soil employing entomopathogenic fungi: Current state of the art and future perspectives. **Heliyon**, v. 10, n. 1, p. 1-17, 2024. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)10614-1](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)10614-1).

TARLA, D. N. et al. Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil. **Applied Sciences**, v. 10, n. 4, p. 1-25, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/4/1217>.

THIRUMALAIVASAN, N. et al. Utilization of fungal and bacterial bioremediation techniques for the treatment of toxic waste and biowaste. **Frontiers in Materials**, v. 11, p. 1416445, 2024. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2024.1416445/full>.

TORRA, J. et al. Metabolism of 2, 4-D in plants: comparative analysis of metabolic detoxification pathways in tolerant crops and resistant weeds. **Pest Management Science**, v. 80, n. 12, p. 6041-6052, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39132883/>.

VAKSMAA, A. et al. Role of fungi in bioremediation of emerging pollutants. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1-21, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1070905/full>.

VAITHYANATHAN V. K.; VAIDYANATHAN, V. K.; CABANA, H. Laccase-driven transformation of high priority pesticides without redox mediators: towards bioremediation of contaminated wastewaters. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 1-13, 2021.

Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2021.770435/full>.

WU, X. et al. Rapid biodegradation of the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid by *Cupriavidus gilardii* T-1. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 18, p. 3711-3720, 2017. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.7b00544>.

XIANG, S. et al. Efficient degradation of phenoxyalkanoic acid herbicides by the alkali-tolerant *Cupriavidus oxalaticus* strain X32. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 68, n. 12, p. 3786-3795, 2020. Disponível: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.9b05061>.

YADAV, A. et al. Endophytic fungal communities and their biotechnological implications for agro-environmental sustainability. **Folia Microbiologica**, v. 67, p. 203-232, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S12223-021-00939-0>.

ZHAO, K. et al. Co-metabolism of microorganisms: A study revealing the mechanism of antibiotic removal, progress of biodegradation transformation pathways. **Science of The Total Environment**, v. 954, p. 176561, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724067172>.