



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
(ILACVN)**

**CIENCIAS BIOLÓGICAS ECOLOGIA Y
BIODIVERSIDAD**

**HONGOS CON POTENCIAL DE BIODEGRADACIÓN DE AGROTÓXICOS:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

OSCAR RAMON CABALLERO CABRAL

Foz do Iguaçu

2024



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
CIÊNCIAS DA VIDA E DA NATUREZA
(ILACVN)**

**CIENCIAS BIOLÓGICAS ECOLOGIA Y
BIODIVERSIDAD**

**HONGOS CON POTENCIAL DE BIODEGRADACIÓN DE AGROTÓXICOS:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

OSCAR RAMON CABALLERO CABRAL

Trabajo de Conclusión de Carrera presentado al Instituto Latinoamericano de Ciencias de la Vida y de la Naturaleza de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito parcial a la obtención del título de Bacharel en Ciencias Biológicas – Ecología y Biodiversidad

Orientador (a): Prof. Dr. Cristian Antonio Rojas

Foz do Iguaçu

2024

OSCAR RAMON CABALLERO CABRAL
**HONGOS CON POTENCIAL DE BIODEGRADACIÓN DE AGROTÓXICOS:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Trabajo de Conclusión de Carrera presentado al Instituto Latinoamericano de Ciencias de la Vida y de la Naturaleza de la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, como requisito parcial a la obtención del título de Bacharel en Ciencias Biológicas – Ecología y Biodiversidad

BANCA EXAMINADORA

Orientador (a): Cristian Antonio Rojas
(UNILA)

Biol. Jordan Lucas de Almeida Teixeira
(Raiz Ambiental)

Biotec. Maria Esther Vivanco Suazo
(UNILA)

Foz do Iguaçu, ____ de ____ de ____.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Oscar Ramon Caballero Cabral

Curso: Ciencias Biológicas, Ecológicas y Biodiversidad

	Tipo de Documento
<input checked="" type="checkbox"/> graduação	<input type="checkbox"/> artigo
<input type="checkbox"/> especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
<input type="checkbox"/> mestrado	<input type="checkbox"/> monografia
<input type="checkbox"/> doutorado	<input type="checkbox"/> dissertação
	<input type="checkbox"/> tese
	<input type="checkbox"/> CD/DVD – obras audiovisuais
	<input type="checkbox"/> _____

Título do trabalho acadêmico: HONGOS CON POTENCIAL DEGRADACIÓN DE AGROTÓXICOS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Nome do orientador(a): Cristian Antonio Rojas

Data da Defesa:

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra gratuitamente e de acordo com a licença pública Creative Commons Licença 3.0 Unported.

Foz do Iguaçu, 02 de outubro de 2024

Assinatura do Responsável

Dedicatoria

Dedico este trabajo a toda mi familia, los que nunca dudaron de mis capacidades y llegaron conmigo hasta el final.

“En tu vida puede haber gente que trate de sabotear tu logros... Pero si te enfocas en el trabajo y no dejas que esa gente te desvíe, algún día llegarás a donde quieres ir, mirarás alrededor y sabrás que fuiste tú y la gente que amas los que te pusieron ahí. Y esa será la mejor sensación del mundo”

TS

AGRADECIMIENTO

Una vez, la mujer más importante del mundo, en su discurso de doctorado dijo, “Ninguno de nosotros hemos logrado esto solos, somos una manta de retazos de aquellos que nos amaron, de aquellos que creyeron en nuestro futuros, de aquellos que nos mostraron empatía y bondad, o que nos dijeron la verdad incluso cuando no lo queríamos oír, De quienes nos dijeron que podíamos lograrlo, aunque no había absolutamente ninguna prueba de que eso fuera verdad”. Estas palabras resuenan profundamente conmigo en este momento, ya que reconozco a las muchas personas que han estado involucradas en mi viaje hasta este punto. Mi gratitud infinita se dirige primero hacia el Dios creador, quien me ha acompañado a través de los diferentes matices del cielo en cada tarde que regresaba a casa: sano, fatigado y seguramente con hambre. Quiero dar mi sincero agradecimiento a mis padres Miguel y Jacinta por tomar las riendas de mi carrera profesional conmigo, por sostenerme y apoyarme incluso en los días que desee dejarlo todo, a mis hermanos Rodrigo, Sabrina y Fabiola por sus cálidos abrazos de bienvenida a casa, de verdad que son cosas que he apreciado desde el día que tuve que madrugar para perseguir mi sueño de ser un profesional en el extranjero.

No hay nada más importante que expresar mi profundo agradecimiento a Alicia, por nuestra historia juntos, y de qué tan afortunado fue de coincidir contigo, tuve el mejor momento de mi vida a tu lado, recordaré cada sentimiento por siempre, de las veces que celebramos por superar materias, por la noches que pasamos estudiando, por las siestas en cualquier rincón de la facultad, por las miradas de complicidad ante cualquier chiste, por los viajes juntos, por los almuerzos compartidos, por las tantas veces que fuiste un inactivador de mis ansiedades y temores mas grandes, sin ti me hubiera rendido en la primera vez que fracasase, y gracias a Dios siempre viste todo mi potencial y me impulsaste a donde estoy hoy ahora, muchas gracias. A Tais Antonelli y Claudia Motte que fueron otras de las grandes impulsoras e inspiración para culminar mi carrera universitaria, soy grato a todos los viajes de regreso a casa con ustedes.

Los años que estuve en la Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, fueron años que marcaron mi vida, una vez leí una frase que decía, “Quien regresa de un viaje, nunca es la misma persona quien partió”, Tal vez no haya ido muy lejos, pero lo lejano vino a mi, con las diferentes personas de otros países que soñaba con conocer, sinceramente fui tan afortunado en encontrar a personas como: James, Araceli, Belen, Nadyne Celeste, Andrea, Alejandra, Maria, Thaynara, Soledad, Arthur, Ana y Julia. estas personas fueron los responsables de contagiarme con su gran calidad humana, Agradezco mucho a cada uno de ustedes, por su apoyo, y aprendizaje.

La UNILA tiene tantas personas que quiero recordar, y estas personas que estuvieron de manera temporal en mi vida, me direccionaron a qué tipo de profesional me gustaría llegar a ser, entre ellos el Profesor Geógrafo: Leonardo Tomazzini, gran ejemplo de humildad, e inteligencia, una persona que es abierto a las cosas que vienen fuera, También a la Técnica Carla B. Pires, ejemplo de solidaridad, servicial y cariño al trabajo y a las personas, agradezco mucho que hayan aparecido en mi trayecto, me he quedado con lo bueno de ustedes.

Principalmente agradezco a mi Orientador, el cual ha decidido embarcarse conmigo en esta travesía que costó muchísimo pero confío en mí para realizar este trabajo que hoy me abre la puerta de salida para el mundo. También agradezco a la banca examinadora: Jordan y Maria.

Agradezco al Parque Tecnológico Itaipu - Paraguay por creer en mis capacidades y brindarme el apoyo financiero por 5 años para la realización de mi carrera profesional, a la par también agradezco a la Itaipú Binacional - Brasil por abrirme las puertas para realizar mi pasantía en el Hospital Veterinario del Refugio Bela Vista, A mis supervisores responsables de la pasantía, Fabiana, Marcos y Aline sus grandes conocimientos enriquecieron mucho mi experiencia laboral en el área y me ha ayudado a direccionar mis nuevas voluntades y seguir aprendiendo siempre.

Y un agradecimiento al Brasil y a la UNILA, que me dieron la oportunidad de crecer, de ser alguien en la vida y de descubrir que hay algo más de las cosas que vemos desde que nacemos, que encontramos puentes sentimentales con personas y lugares que cruzamos una sola vez en la vida.

“Ningún hombre es una isla entera por sí mismo”, Por eso agradezco de manera general a cada persona que ha contribuido a mi vida, tanto personal como profesional, a mis amigos de casa, amigos de barrio, amigos de internet, a mis familiares más cercanos y más lejanos, Gracias. Y por fin este es el final de uno de los capítulos de mi vida, aquí en este documento es el cierre, y afortunadamente esta historia ya no me pertenece!

AGUYJE!!

CABALLERO CABRAL, Oscar Ramón. **HONGOS CON POTENCIAL DE BIODEGRADACIÓN DE AGROTÓXICOS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** 43 p. Trabajo de Conclusión de Curso (Bachiller Ciencias Biológicas Ecología Y Biodiversidad) - Universidad Federal de Integración Latinoamericana, Foz do Iguazú, 2024.

RESUMEN

El uso intensivo de agroquímicos, como plaguicidas y fertilizantes, ha generado una serie de impactos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana, debido a la persistencia de estos compuestos en el ambiente. La acumulación de agrotóxicos en suelos agrícolas es un problema de gran relevancia, ya que estos contaminantes son difíciles de degradar por medios naturales, afectando la biodiversidad y la funcionalidad de los suelos.

En este contexto, la biorremediación surge como una alternativa sostenible para mitigar la contaminación ambiental. Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sobre el uso de hongos ligninolíticos, especialmente los hongos de pudrición blanca, como agentes biodegradadores de agrotóxicos. Se describen los mecanismos enzimáticos involucrados en la degradación de estos compuestos, destacando la acción de enzimas como la lignina peroxidasa (LiP), la manganeso peroxidasa (MnP) y la lacasa (LCC), que permiten a estos hongos transformar compuestos recalcitrantes en sustancias menos tóxicas.

Además, se presenta un estudio de caso sobre *Trametes versicolor*, un hongo ligninolítico que ha demostrado una alta eficiencia en la degradación de pesticidas hidrofóbicos como el clorpirifos, el dicofol y la cipermetrina, alcanzando tasas de eliminación superiores al 90% bajo condiciones controladas. Los resultados de este análisis resaltan el potencial de los hongos como una herramienta viable para la biorremediación de suelos contaminados, y otro estudio de caso sobre los hongos filamentosos el cual demuestra un potencial a diferente grado de biodegradación.

A pesar de los avances en este campo, la implementación a gran escala de estos hongos enfrenta desafíos, tales como la optimización de las condiciones ambientales y la interacción con otros microorganismos en entornos naturales. Este trabajo concluye que la biorremediación fúngica, aunque prometedora, requiere mayor investigación y desarrollo tecnológico para su aplicación efectiva en el campo.

Palabras Claves: Hongos; ligninolíticos; Degradación de agrotóxicos; Enzimas ligninolíticas; *Trametes versicolor*; Plaguicidas organofosforados; Contaminación del suelo Biodegradación.

CABALLERO CABRAL, Oscar Ramón. **FUNGOS COM POTENCIAL DE BIODEGRADAÇÃO DE AGROTÓXICOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas, Ecologia e Biodiversidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguazú, 2024.

RESUMO

O uso intensivo de agroquímicos, como pesticidas e fertilizantes, gerou uma série de impactos negativos nos ecossistemas e na saúde humana devido à persistência desses compostos no ambiente. A acumulação de agrotóxicos em solos agrícolas é um problema de grande relevância, pois esses contaminantes são difíceis de degradar por meios naturais, afetando a biodiversidade e a funcionalidade dos solos.

Nesse contexto, a biorremediação surge como uma alternativa sustentável para mitigar a contaminação ambiental. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de fungos ligninolíticos, especialmente os fungos de podridão branca, como agentes biodegradadores de agrotóxicos. São descritos os mecanismos enzimáticos envolvidos na degradação desses compostos, destacando a ação de enzimas como a lignina peroxidase (LiP), a manganês peroxidase (MnP) e a lacase (LCC), que permitem a esses fungos transformar compostos recalcitrantes em substâncias menos tóxicas.

Além disso, é apresentado um estudo de caso sobre *Trametes versicolor*, um fungo ligninolítico que demonstrou alta eficiência na degradação de pesticidas hidrofóbicos como clorpirifós, dicofol e cipermetrina, alcançando taxas de eliminação superiores a 90% em condições controladas. Os resultados desta análise ressaltam o potencial dos fungos como uma ferramenta viável para a biorremediação de solos contaminados. E outro estudo de caso sobre fungos filamentosos que demonstra potencial para diferentes graus de biodegradação.

Apesar dos avanços nesta área, a implementação em larga escala desses fungos enfrenta desafios, como a otimização das condições ambientais e a interação com outros microrganismos em ambientes naturais. Este trabalho conclui que a biorremediação fúngica, embora promissora, requer mais pesquisas e desenvolvimento tecnológico para sua aplicação eficaz em campo.

Palavras Chaves: Biorremediação; Fungos ligninolíticos; Degradação de agrotóxicos; Enzimas ligninolíticas; Trametes versicolor; Pesticidas organofosforados; Contaminação do solo; Biodegradação.

CABALLERO CABRAL, Oscar Ramón. **FUNGI WITH POTENTIAL FOR BIODEGRADATION OF AGROTOXIC: A REVIEW** 43 p. Projeto de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas, Ecologia e Biodiversidade) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguazú, 2024.

ABSTRACT

The intensive use of agrochemicals, such as pesticides and fertilizers, has generated a series of negative impacts on ecosystems and human health due to the persistence of these compounds in the environment. The accumulation of agrochemicals in agricultural soils is a major concern, as these contaminants are difficult to degrade through natural means, affecting soil biodiversity and functionality.

In this context, bioremediation emerges as a sustainable alternative to mitigate environmental contamination. This thesis presents a bibliographic review on the use of ligninolytic fungi, especially white-rot fungi, as biodegraders of agrochemicals. The enzymatic mechanisms involved in the degradation of these compounds are described, highlighting the role of enzymes such as lignin peroxidase (LiP), manganese peroxidase (MnP), and laccase, which allow these fungi to transform recalcitrant compounds into less toxic substances.

Additionally, a case study on *Trametes versicolor* is presented, a ligninolytic fungus that has shown high efficiency in degrading hydrophobic pesticides such as chlorpyrifos, dicofol, and cypermethrin, achieving removal rates above 90% under controlled conditions. The results of this analysis highlight the potential of fungi as a viable tool for bioremediation of contaminated soils. and another case study on filamentous fungi which demonstrates a potential for varying degrees of biodegradation.

Despite the advancements in this field, large-scale implementation of these fungi faces challenges, such as optimizing environmental conditions and interacting with other microorganisms in natural settings. This work concludes that fungal bioremediation, while promising, requires further research and technological development for effective field application.

Keywords: Bioremediation; Ligninolytic fungi; Agrochemical degradation; Ligninolytic enzymes; Trametes versicolor; Organophosphorus pesticides; Soil contamination; Biodegradation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de la lacasa.....	20
Figura 2 Mecanismo De Acción De Las Enzimas Ligninolíticas, Lacasa Y Manganese Peroxidasa.....	22
Figura 3 Mecanismo De Acción De La Lignina Peroxidasa.....	23
Figura 4, Proceso De Biodegradación De La Lignina.....	24

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	13
2 USOS E IMPACTOS DE LOS AGROQUÍMICOS.....	14
4 BIORREMEDIACIÓN.....	17
5 HONGOS LIGNINOLÍTICOS:.....	18
6 FUNCIÓN DE LOS HONGOS LIGNINOLÍTICOS EN LA DEGRADACIÓN DE SUSTANCIAS TÓXICAS.....	19
7 ESTUDIO DE CASO: BIODEGRADACIÓN POR <i>Trametes versicolor</i>.....	25
7.1 Resultados Positivos.....	25
8 HONGOS FILAMENTOSOS.....	26
9 METODOLOGÍA.....	28
Objetivo de la Revisión.....	28
Criterios de Selección.....	28
Fuentes de Información.....	28
Palabras Clave y Estrategias de Búsqueda.....	29
10 RESULTADOS.....	30
11 DISCUSIÓN.....	33
11.1 Limitaciones y Factores que Obstaculizan la Comercialización.....	34
11.2 Condiciones Óptimas para la Biorremediación.....	35
12 CONCLUSIÓN.....	36
12 REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos es un problema ambiental creciente y alarmante que ha cobrado relevancia en las últimas décadas, especialmente en zonas agrícolas, debido al uso desmedido de agroquímicos y actividades industriales (MILENA & JAVIER, 2009). Este fenómeno, alimentado por la expansión agrícola y la industrialización, ha llevado a la acumulación de contaminantes nocivos en el suelo, generando efectos devastadores en los ecosistemas naturales y representando una seria amenaza para la biodiversidad y la salud humana (TORRES, 2003). Los suelos agrícolas, que constituyen la base de nuestra seguridad alimentaria, están enfrentando una amenaza creciente debido a la presencia de diversos contaminantes, incluyendo metales pesados, hidrocarburos y plaguicidas (GAYLARDE, BELLINASSO Y MANFIO, 2005).

Estos contaminantes recalcitrantes generan efectos tóxicos de larga duración y estos contaminantes provocan alteraciones significativas en las comunidades biológicas del suelo (TORRES, 2003). La persistencia de estos elementos en el entorno agrícola crea desequilibrios ecológicos, afectando la diversidad y el funcionamiento de los microorganismos, plantas y animales que dependen de un suelo saludable para prosperar. (NACIONES UNIDAS CONVENCIÓN DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN, 2017) Estos cambios en las dinámicas biológicas del suelo no solo comprometen la productividad agrícola, sino que también amenazan la estabilidad de los ecosistemas circundantes, lo que subraya la necesidad urgente de implementar estrategias efectivas de biorremediación y conservación del suelo.

Ante esto, la biorremediación, a través de la utilización de plantas y microorganismos, ha emergido como una alternativa viable y ecológica para el tratamiento de suelos contaminados (GARZÓN; MIRANDA; GÓMEZ, 2017). Esta estrategia se basa en la capacidad natural de ciertas plantas, conocidas como plantas fitorremediadoras, y microorganismos para absorber, transformar o degradar contaminantes químicos presentes en el suelo. Al aprovechar los procesos biológicos naturales, la biorremediación se presenta como una opción sostenible que no solo ayuda a restaurar la calidad del suelo, sino que también contribuye a la conservación del medio ambiente y al bienestar humano. (COVARRUBIAS; BERUMEN; CABRIALES, 2015).

El éxito de la biorremediación radica en la interacción compleja de factores fisicoquímicos y biológicos en el suelo, tales como la temperatura, el pH, la disponibilidad de nutrientes y la diversidad de poblaciones microbianas presentes. Estos elementos interconectados influyen directamente en la eficacia de los procesos de degradación de

contaminantes, determinando la viabilidad y efectividad de las estrategias biorremediadoras implementadas (GARZÓN JM, 2017). En este contexto, surge la posibilidad de aplicar microorganismos, como aquellos que forman parte del grupo de los hongos ligninolíticos, en la biorremediación de suelos contaminados con agroquímicos. Los hongos, conocidos por su diversidad metabólica y su capacidad para degradar compuestos orgánicos complejos, se presentan como candidatos prometedores para este propósito. Tienen la capacidad de secretar enzimas extracelulares que pueden transformar y degradar una variedad de agroquímicos, convirtiéndolos en herramientas valiosas para la remoción de estos contaminantes del suelo. (NAID MAYRA GOMEZ DELGADO, 2020)

2 USOS E IMPACTOS DE LOS AGROQUÍMICOS

Los agroquímicos, como los plaguicidas y fertilizantes sintéticos, son ampliamente utilizados en la agricultura para aumentar el rendimiento de los cultivos a corto plazo y satisfacer las demandas de la población. Los fertilizantes proporcionan nutrientes directamente a las plantas y los plaguicidas eliminan las plantas innecesarias y controlan los fitopatógenos, lo que resulta, en conjunto, en frutas y verduras más grandes y mayores rendimientos. Además, los agroquímicos son más económicos en comparación con las alternativas naturales. (BASSO; SIQUEIRA; RICHARDS, 2021)

Según Alves Lopes y Cavalcanti de Albuquerque, (2018), en una revisión sistemática de estudios entre 2011-2017, fue evidente que los pesticidas causan daños a los insectos, el agua, el suelo y los peces. Pignati *et al*, (2014) mostraron que Mato Grosso, Paraná y Rio Grande do Sul fueron los estados que más consumieron pesticidas en 2015, debido a la gran producción de soja, maíz y caña de azúcar. Estos investigadores asociaron positivamente el uso de pesticidas con intoxicaciones agudas, malformaciones fetales y cáncer infantil, destacando la necesidad de acciones de vigilancia de la salud en los municipios.

Suárez, Brodeur y Zaccagnini (2013) explican que los pesticidas contaminan el medio ambiente a través de fuentes puntuales, como la manipulación y eliminación de envases, y a través de fuentes difusas, como la deriva durante la aplicación y el escurrimiento superficial. Los pesticidas contaminan las aguas superficiales y subterráneas, el suelo y el aire. Así también otros autores como Suarez, Brodeur y Zaccagnini (2013) dicen que el uso de pesticida afecta a organismos, poblaciones, comunidades y ecosistemas no objetivos. La utilización de los pesticidas ocasionan efectos sobre la reproducción, el desarrollo y la fisiología de la biota. Los pesticidas pueden biomagnificarse en cadenas tróficas y

transportarse a distancias considerables, por lo que estos autores refuerzan la necesidad de estrategias de seguimiento, evaluación de impacto y medidas para prevenir y mitigar los efectos de los pesticidas en la biodiversidad.

La soja, cultivada extensamente en la región del Paraná, representa una pieza fundamental en lo económico de Brasil. En 2015, esta cosecha ocupó el 42% de toda la tierra dedicada a la agricultura en el país, equivalente a una asombrosa extensión de 32,2 millones de hectáreas (PIGNATI *et al.*, 2017a). Sin embargo, esta contribución económica masiva no llega sin su cuota de desafíos, especialmente en el ámbito de la sostenibilidad medioambiental. La producción convencional de soja en esta región sigue caracterizándose por el uso intensivo de agroquímicos. Según el boletín informativo de la agência de defesa agropecuária do paraná (ADAPAR, 2024), los agrotóxicos más utilizados incluyen glifosato, que se emplea ampliamente en cultivos como arroz, maíz, soja y pasturas; acetamiprido, aplicado en cultivos de soja, sorgo y diversas hortalizas; deltametrina, común en cultivos de man  y cebada; metsulfuron-met lico, utilizado en cultivos de soja y maíz; y sulfentrazone, también aplicado en los cultivos de maíz y soja. Estos productos forman parte de una lista más amplia de agroquímicos utilizados en la agricultura para el control de plagas y malezas. s

Este escenario plantea interrogantes cruciales acerca de la sostenibilidad del cultivo de soja en la región. La cercanía entre las explotaciones agrícolas convencionales y las orgánicas ha resultado en la contaminación de los productos orgánicos, lo que intensifica la necesidad de encontrar soluciones efectivas y sostenibles para este dilema (INAGAKI; JUNQUEIRA; BELLON, 2018). Por ende, se vuelve imperativo explorar enfoques innovadores como la biorremediación con hongos para mitigar los impactos negativos de los agroquímicos en los suelos de cultivo, asegurando así la sostenibilidad a largo plazo de la producción de soja en la región del Paraná.

El uso intensivo de agrotóxicos en los cultivos de soja tiene varios impactos negativos en el medio ambiente y la salud. Además, se ha observado que el uso excesivo de agrotóxicos en los cultivos de soja puede provocar la aparición de resistencia en las plagas, lo que a su vez aumenta la necesidad de utilizar más agrotóxicos. Además de los impactos ambientales, el uso de agrotóxicos en los cultivos de soja también puede tener consecuencias para la salud humana. La exposición a estos productos químicos puede estar relacionada con problemas de salud como enfermedades respiratorias, trastornos endocrinos, cáncer y problemas reproductivos. La soja es conocida por su alta tolerancia a la contaminación, incluyendo la contaminación por agrotóxicos. Según estudios, la soja tiene la capacidad de

absorber y acumular una cantidad significativa de agrotóxicos sin sufrir daños graves en su crecimiento y desarrollo (SILVA, 2019). Esta tolerancia de la soja a la contaminación se debe en parte a su sistema de raíces profundas y su capacidad para absorber nutrientes y agua del suelo de manera eficiente. Además, la soja tiene la capacidad de metabolizar y descomponer algunos agrotóxicos, lo que le permite resistir mejor los efectos negativos de la contaminación (DUKE; POWLES, 2008)

3. TIPOS DE AGROQUÍMICOS

Los agroquímicos usados actualmente en la agricultura para combatir plagas, enfermedades y malezas, juegan un papel crucial en la protección de los cultivos en Brasil. En diferentes tipos de cultivos, desde la soja hasta los frutales, se utilizan diversos agroquímicos. A continuación, se presenta una lista de algunos de los agroquímicos más comúnmente utilizados en Brasil

Agroquímico	Cultivos
Glifosato	Soja, maíz, algodón
2,4-D	Maíz, trigo, arroz
Mancozeb	Hortalizas, frutas, cereales
Clorotalonil	Hortalizas, frutas, cereales
Atrazina	Maíz, caña de azúcar
Acefato	Arroz, frutas, hortalizas
Malatión	Frutas, hortalizas
Clethodim	Soja, maíz
Azufre agrícola	Frutas, hortalizas, cereales
S-metolacoloro	Maíz, soja

TABLA 1 lista de agrotóxicos más utilizados y cultivos principales. FUENTE: (LUCAS, 2023)

4 BIORREMEDEIACIÓN

La biorremediación consiste en el uso de organismos vivos, principalmente plantas, hongos y bacterias, para eliminar, reducir o volver inocuos los contaminantes ambientales (GAYLARDE, C. C; BELLINASO, M. L, 2005). Ésta se basa en aprovechar la diversidad metabólica de los microorganismos para degradar compuestos tóxicos mediante enzimas catalíticas o la acción consorciada de comunidades microbianas (TORRES, 2003).

Desde una perspectiva económica, la biorremediación puede ser una alternativa más sostenible que las técnicas fisicoquímicas tradicionales para el tratamiento de problemas de contaminación. Inclusive, en algunos casos, la biorremediación puede ser más económica que otras técnicas, ya que utiliza organismos vivos para llevar a cabo el proceso de limpieza, lo que puede reducir los costos de energía y materiales. Normalmente, la biorremediación suele ser una solución a largo plazo, ya que puede restaurar el ambiente de manera natural y sostenible, pudiendo reducir los costos de mantenimiento y monitoreo a largo plazo (GARZÓN JM, 2017).

La biorremediación permite el tratamiento de contaminantes como hidrocarburos, plaguicidas, colorantes, metales pesados, entre otros (TORRES, 2003). El monitoreo de genes y microorganismos durante la biorremediación es de gran ayuda y se puede realizar mediante técnicas moleculares independientes de cultivo (GAYLARDE *ET AL.*, 2005). Entre los métodos de biorremediación se encuentran la bioaumentación, que consiste en incorporar cepas microbianas con capacidad degradadora a un ambiente contaminado, y la bioestimulación, que promueve el crecimiento de los microorganismos nativos mediante la adición de nutrientes y ajuste de condiciones (JARAMILLO *ET AL.*, 2016). La bioaumentación impacta a las comunidades microbianas nativas, por lo que se debe estudiar este efecto (Petter, 2022).

Los hongos ligninolíticos o de pudrición blanca tienen un gran potencial para la biorremediación debido a su versatilidad metabólica y capacidad de producir enzimas extracelulares que degradan contaminantes orgánicos como plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, colorantes, entre otros (CARLOS, 2009) Estudios en suelos contaminados con plaguicidas organofosforados han aislado bacterias degradadoras pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae con capacidad para utilizar estos compuestos como fuente de carbono (JARAMILLO *ET AL.*, 2016).

La biorremediación microbiana puede alcanzar altas tasas de eficiencia y eficacia a bajos costos, llevando a una recuperación o mitigación de ambientes contaminados

(CARLOS, 2009). Sin embargo, factores como biodisponibilidad, concentración del contaminante, condiciones ambientales y presencia de microflora antagonista pueden limitar su efectividad. El uso combinado de estrategias como bioaumentación con soportes lignocelulósicos puede ayudar a superar algunas de estas limitaciones.

5 HONGOS LIGNINOLÍTICOS:

Los hongos ligninolíticos, también conocidos como hongos de pudrición blanca, son un grupo de basidiomicetos capaces de degradar la lignina, uno de los polímeros naturales más complejos presentes en la madera (CARLOS, 2009). Además de su papel en la degradación de la lignina, estos hongos son reconocidos por su capacidad para descomponer una amplia variedad de contaminantes ambientales, incluyendo plaguicidas. Producen un sistema enzimático extracelular que incluye lignina peroxidasas (LiP), manganeso peroxidasas (MnP) y lacasas, enzimas clave para su actividad degradadora (CARDONA, 2022). Según Quintero et al. (2009), estas enzimas presentan poca especificidad, lo que les permite degradar una amplia gama de contaminantes orgánicos recalcitrantes, como plaguicidas, colorantes e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Las principales fortalezas de estos hongos incluyen su capacidad para tolerar concentraciones extremadamente altas de contaminantes y su habilidad para prosperar en entornos con bajos niveles de pH. Además, gracias a la expansión de sus hifas, tienen la capacidad de acceder a contaminantes en el suelo que no son accesibles ni biodegradables para otros organismos. Dado que necesitan sustratos lignocelulósicos para su desarrollo, es factible añadir materiales de bajo costo, como virutas de madera, residuos de maíz o paja de trigo, en sitios contaminados para fomentar su crecimiento y aumentar la descomposición de los contaminantes. En un ejemplo claro del uso de los hongos ligninolíticos, vemos al hongo *Phanerochaete chrysosporium*, que ha mostrado degradar hasta un 90% de naftaleno (un PAH) en unos 15 días. *Trametes versicolor* puede decolorar un 80% de un colorante textil azoico en 24 horas (NAID MAYRA GOMEZ DELGADO, 2020)

Diversos estudios han evaluado el potencial de hongos ligninolíticos como *Phanerochaete chrysosporium*, *Bjerkandera adusta*, *Trametes versicolor* y *Pleurotus ostreatus* para la biorremediación de suelos y aguas contaminadas con plaguicidas organoclorados como DDT, lindano, aldrín, dieldrín; organofosforados como clorpirifos; y

otros como pentaclorofenol. Si bien en algunos casos la degradación de estos contaminantes depende principalmente de las enzimas ligninolíticas, para muchos plaguicidas este sistema parece tener poca relevancia. Otros mecanismos importantes involucran enzimas de oxidación (citocromo P450 monooxigenasas) y reducción (glutación S-transferasas) similares a las fases I y II del metabolismo en mamíferos (QUINTERO, 2011).

Diversos microorganismos han sido estudiados por su capacidad para degradar contaminantes y pueden ser empleados en la biorremediación de suelos. Por ejemplo, las bacterias del género *Serratia sp.* y *Pseudomonas sp.* aisladas de suelos tienen la habilidad de utilizar el plaguicida organofosforado diazinon como fuente de carbono, por lo que representan una alternativa para el tratamiento de este tipo de contaminantes (CYCON ET AL., 2009).

Asimismo, se ha encontrado que hongos ligninolíticos como *Phanerochaete chrysosporium*, *Bjerkandera* y *Pleurotus ostreatus* pueden degradar una amplia variedad de plaguicidas organoclorados y organofosforados, así como otros contaminantes ambientales (Quintero, 2011). La inoculación de estos hongos en suelos contaminados, particularmente cuando se agregan soportes lignocelulósicos, favorece su crecimiento, estimula la producción de enzimas extracelulares y mejora la biodegradación.

Otros estudios han aislado bacterias degradadoras de la familia Enterobacteriaceae a partir de suelos contaminados con plaguicidas organofosforados (Jaramillo et al., 2016). Cepas identificadas como *Enterobacter sp.* demostraron la capacidad de utilizar y mineralizar este tipo de compuestos.

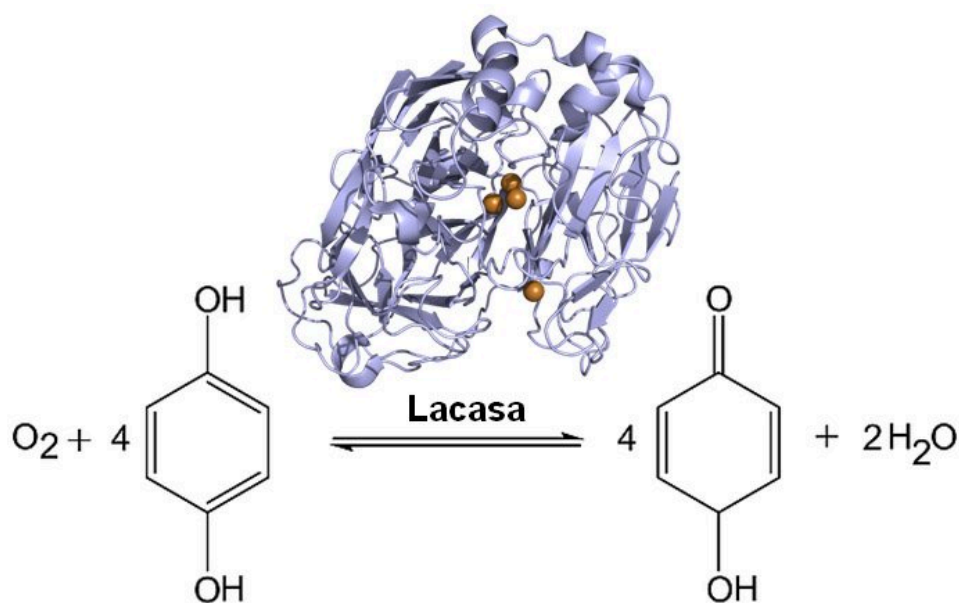
6 FUNCIÓN DE LOS HONGOS LIGNINOLÍTICOS EN LA DEGRADACIÓN DE SUSTANCIAS TÓXICAS

Los hongos desempeñan un papel crucial en la descomposición de materia orgánica, especialmente en la degradación de compuestos complejos como la lignina, un componente principal de la biomasa vegetal, puede interactuar con agrotóxicos (pesticidas, herbicidas y fungicidas) en el suelo y en los residuos agrícolas. (CAMACHO-MORALES et al., 2017). Algunos hongos y microorganismos que descomponen la lignina también tienen la capacidad de degradar agrotóxicos, utilizando sus enzimas ligninolíticas. Para llevar a cabo esta tarea, los hongos han desarrollado una variedad de enzimas oxidativas que les permiten romper los enlaces químicos robustos presentes en la lignina y otros sustratos complejos.

Entre estas enzimas, destacan las siguientes:

6.1 Lacasas (LCC): Estas enzimas pertenecen a la familia de las oxidoreductasas y son capaces de oxidar compuestos fenólicos, lo que las convierte en herramientas esenciales en la degradación de la lignina. Las lacasas utilizan oxígeno molecular para catalizar reacciones de oxidación, generando radicales libres que pueden atacar y romper enlaces en la estructura de la lignina. Su capacidad para actuar sobre una amplia gama de sustratos las hace valiosas en procesos de biorremediación y en la industria del papel. (ATIWESH et al., 2021)

Su estructura se compone de tres dominios principales: los dominios de cupredoxina, que contienen cuatro átomos de cobre esenciales para la actividad catalítica; un sitio de unión del sustrato, que determina la selectividad de la enzima para diferentes compuestos; y una estructura de soporte de carbohidratos y moléculas de agua que estabilizan la enzima. Esta configuración estructural permite a la lacasa oxidar una amplia variedad de compuestos, haciendo de ella una herramienta valiosa en procesos de bioremediación. (ARREGUI et al., 2019)



Armstrong Research Group, Oxford, UK

Figura 1: Estructura de la lacasa

En la Figura 1, se presenta la estructura tridimensional de la lacasa, destacando los átomos de cobre (naranja) que son fundamentales para su actividad

enzimática. La lacasa cataliza la oxidación de compuestos fenólicos, como se muestra en la ecuación química adjunta, donde el catecol se oxida en presencia de oxígeno molecular, produciendo compuestos oxidados y agua. Este proceso es crucial en la biodegradación de contaminantes orgánicos, subrayando la importancia de las lacasas en la biorremediación de ambientes contaminados (ARMSTRONG RESEARCH GROUP, OXFORD, UK).

6.2 Peroxidasas de manganeso (MnP): Estas enzimas son fundamentales en la degradación de la lignina, ya que utilizan peróxido de hidrógeno como cofactor para oxidar sustratos. Las MnP son especialmente efectivas en la oxidación de lignina no fenólica, lo que es crucial para la mineralización de este polímero complejo. A través de un mecanismo que involucra la formación de radicales libres, las MnP pueden descomponer la lignina en segmentos más pequeños que pueden ser metabolizados por otros microorganismos. (TORRES-FARRADÁ ET AL., 2024)

La manganeso peroxidasa (MnP) desempeña un papel crucial en la biodegradación de compuestos orgánicos mediante la oxidación de Mn^{2+} a Mn^{3+} en presencia de H_2O_2 . Este Mn^{3+} actúa como un potente agente oxidante, capaz de formar complejos con diversos sustratos orgánicos, incluyendo fenoles. La interacción con estos sustratos facilita su posterior oxidación y la ruptura de enlaces químicos, lo que resulta en la degradación de contaminantes. Sin embargo, la actividad de la MnP puede verse afectada por la concentración de nutrientes en el medio y los niveles de H_2O_2 , ya que concentraciones elevadas pueden inhibir la enzima (CONSUELO, 2022),

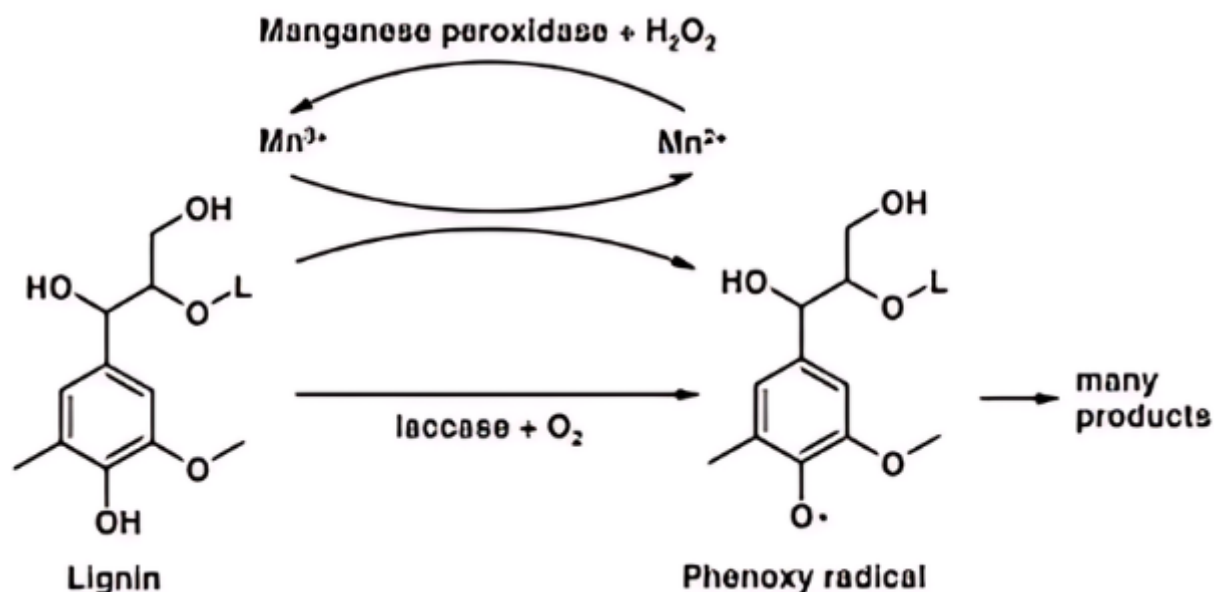


Figura 2 Mecanismo De Acción De Las Enzimas Ligninolíticas, Lacasa Y Manganese Peroxidasa

En la Figura 2, se presenta el mecanismo de acción de las enzimas ligninolíticas, lacasa y manganese peroxidasa, en la degradación de la lignina. La lacasa utiliza oxígeno molecular (O₂) para oxidar compuestos fenólicos, generando radicales fenólicos que descomponen la estructura de la lignina. Por otro lado, la manganese peroxidasa cataliza la oxidación de Mn²⁺ a Mn³⁺ utilizando peróxido de hidrógeno (H₂O₂), que también contribuye a la generación de radicales necesarios para la degradación de la lignina. Estos procesos combinados facilitan la conversión de lignina en varios productos más simples, mejorando así su biodegradación ((CORDOBA; CULTID, 2015)

6.3 Peroxidasas de lignina (LiP): Estas enzimas son específicas para la degradación de la lignina y son capaces de romper enlaces químicos difíciles de descomponer. Las LiP utilizan peróxido de hidrógeno para llevar a cabo reacciones de oxidación, generando radicales que atacan la estructura lignocelulósica. Su acción es fundamental en el ciclo de descomposición de la materia orgánica, permitiendo que los nutrientes sean reciclados en el ecosistema. (RE; VERÓNICA, 2016)

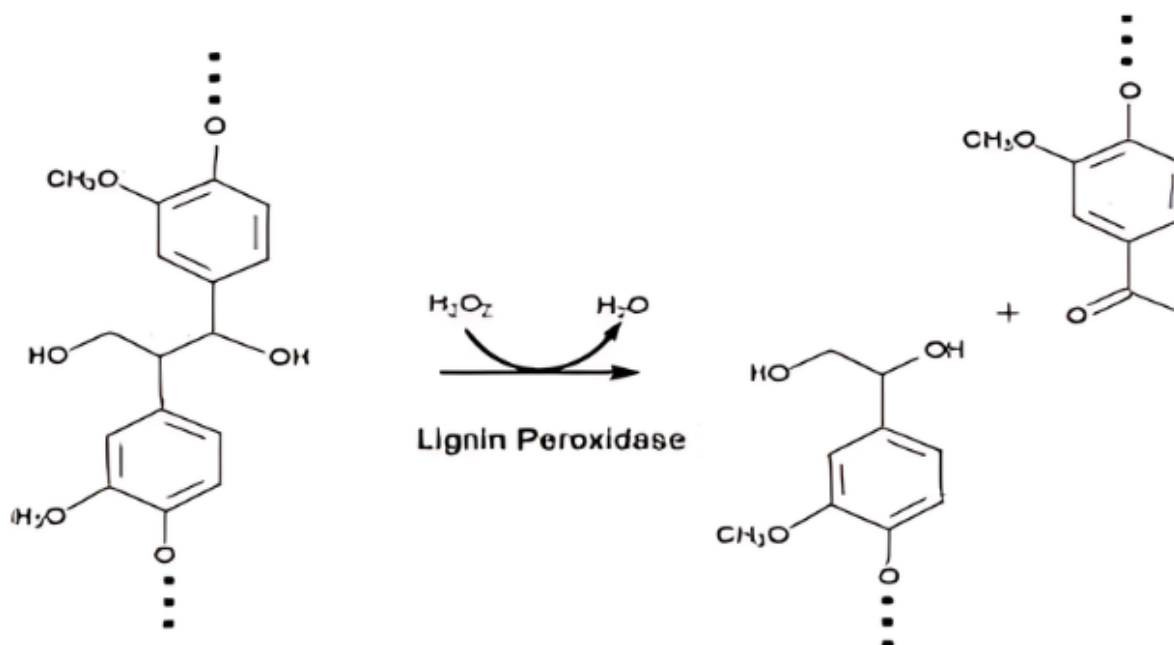


Figura 3 Mecanismo De Acción De La Lignina Peroxidasa

En la Figura 3, se ilustra el mecanismo de acción de la lignina peroxidasa (LiP) durante la biodegradación de la lignina. La LiP, en presencia de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), cataliza la oxidación de la lignina, generando radicales fenólicos que provocan la ruptura de su estructura compleja. Este proceso de despolimerización es crucial para la biodegradación de la lignina, ya que transforma un polímero recalcitrante en compuestos más simples y susceptibles de ser mineralizados por otros microorganismos

6.4 Peroxidasas versátiles (VP): Las peroxidasas versátiles presentan una estructura que combina características de las peroxidasas de lignina (LiP) y las manganeso peroxidasa (MnP). (MORENO et al., 2019a) Esta estructura híbrida les permite llevar a cabo un ciclo enzimático que facilita la oxidación de lignina y otros compuestos orgánicos. A diferencia de otras peroxidasas, las VP no requieren la presencia de iones de manganeso (Mn²⁺) para su actividad, lo que amplía su rango de acción en la degradación de sustratos. El mecanismo de acción de las peroxidasas versátiles implica el uso de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) como oxidante primario. A través de un ciclo catalítico, estas enzimas generan radicales libres que inician la oxidación de la lignina, promoviendo la ruptura de enlaces químicos y la formación de productos más simples y menos tóxicos. Este proceso es crucial para la descomposición de

7 ESTUDIO DE CASO: BIODERADACIÓN POR *Trametes versicolor*.

El artículo “Exploring the degradation capability of *Trametes versicolor* on selected hydrophobic pesticides through setting sights simultaneously on culture broth and biological matrix” de Hu et al. Publicado en el año (2020), examina la capacidad del hongo *Trametes versicolor* de degradar pesticidas hidrofóbicos, específicamente clorpirifos, dicofol y cipermetrina. *Trametes versicolor* es un hongo ligninolítico que se encuentra en la madera en descomposición. Este hongo es notable por su capacidad para degradar compuestos orgánicos complejos, como la lignina y diversos pesticidas, gracias a la producción de enzimas extracelulares como ligninasa, lacasa y celulasa. Su habilidad para descomponer estos materiales lo convierte en un agente importante en procesos de biorremediación, donde se utiliza para limpiar suelos contaminados (FRAGUEIRO & MAGAN, 2008). Los resultados obtenidos son prometedores y destacan el potencial de este hongo en aplicaciones de biorremediación.

7.1 Resultados Positivos

Eficiencia de Degradación: *Trametes versicolor* mostró tasas de eliminación significativas de los pesticidas estudiados, alcanzando un 94.7% de eliminación para clorpirifos, 87.9% para dicofol y 93.1% para cipermetrina. Estos resultados indican que el hongo es altamente efectivo en la degradación de compuestos tóxicos, lo que sugiere su viabilidad en la limpieza de entornos contaminados.

Contribución de la Biodegradación y Adsorción: El estudio destaca que la eliminación de pesticidas no solo se debe a la biodegradación, sino también a la adsorción. La rápida adsorción inicial representó más del 90% de la eliminación, lo que sugiere que *T. versicolor* puede ser efectivo en la captura de contaminantes en su entorno, mejorando así su capacidad de biorremediación.

Condiciones Realistas de Prueba: Los experimentos se llevaron a cabo en concentraciones realistas de 5 mg/L, lo que aumenta la relevancia de los resultados en contextos ambientales reales. Esto sugiere que el uso de *T. versicolor* podría ser aplicable en situaciones de contaminación en el mundo real, donde las concentraciones de pesticidas suelen ser bajas.

Potencial para la Biorremediación: La investigación resalta el potencial de *Trametes versicolor* como una herramienta biológica para la biorremediación de suelos y

aguas contaminadas. Dado su alto rendimiento en la degradación de pesticidas, este hongo podría ser una alternativa sostenible y ecológica frente a métodos químicos de limpieza, que a menudo tienen efectos secundarios negativos en el medio ambiente

8 HONGOS FILAMENTOSOS

Los hongos filamentosos son organismos eucariotas multicelulares que se caracterizan por su estructura en forma de filamentos, llamados hifas, los cuales se organizan en una red llamada micelio. Estos hongos tienen un rol esencial en los ecosistemas por su capacidad para descomponer materia orgánica, contribuyendo al reciclaje de nutrientes. Además, se resalta su potencial para biodegradar materiales complejos, como el caucho de neumáticos y agroquímicos, debido a que producen enzimas extracelulares que pueden romper los enlaces químicos de estos compuestos. (SÁNCHEZ et al., 2015a)

Los hongos filamentosos, como *Umbelopsis isabellina*, degradan agroquímicos mediante un proceso enzimático complejo que incluye la biotransformación del compuesto a través de enzimas como el citocromo P450. Este sistema enzimático cataliza la oxidación del herbicida 2,4-D, transformándolo en metabolitos menos tóxicos como el 2,4-diclorofenol. La participación de estas enzimas es crucial, ya que permiten al hongo romper las estructuras moleculares del agroquímico, reduciendo significativamente su toxicidad en el ambiente y facilitando su posterior asimilación como fuente de carbono (NYKIEL-SZYMAŃSKA e colab., 2017)

Por otro lado, otros hongos filamentosos, como las especies de *Trichoderma* y *Curvularia*, aplican mecanismos similares en la degradación de materiales recalcitrantes como el caucho de neumáticos, utilizando enzimas oxidativas como lacasas y peroxidasas. Estas enzimas son capaces de descomponer las complejas estructuras poliméricas del caucho, un proceso conocido como despolimerización, lo que permite a los hongos asimilar los productos resultantes como nutrientes. Además, estos hongos pueden detoxificar el material al neutralizar compuestos tóxicos, como los metales pesados presentes en los neumáticos, lo que facilita la biodegradación completa del material (GOMEZ DELGADO; SÁNCHEZ CUESTA, 2018)

8.1 Estudio de Caso: Tolerancia de Hongos Filamentosos a Plaguicidas

El estudio “Tolerancia de Hongos Filamentosos a Plaguicidas en Condiciones In Vitro” de Katina STAMATIU SÁNCHEZ en el 2015 investiga la tolerancia de hongos filamentosos a plaguicidas, específicamente endosulfán, clorpirifos y clorotalonil, con el objetivo de evaluar su potencial para ser utilizados en procesos de biorremediación. La autora describe que se seleccionaron diez cepas de hongos filamentosos aisladas de sustratos como paja de trigo y suelo agrícola. Los plaguicidas utilizados en el estudio fueron formulaciones técnicas de endosulfán, clorpirifós y clorotalonil. Se diseñó un experimento completamente al azar, donde se aplicaron diferentes dosis de cada plaguicida a las cepas de hongos. Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) para evaluar el crecimiento de los hongos en presencia de los plaguicidas.

Los resultados mostraron que las cepas de hongos presentaron diferentes grados de tolerancia a los plaguicidas evaluados. En particular, algunas cepas mostraron un crecimiento significativo a pesar de la presencia de los plaguicidas, sugiriendo que podrían utilizar estos compuestos como fuente de carbono tras un periodo de adaptación. Una cepa de la investigación (*Fusarium* sp. K12P) demostró buena tolerancia al endosulfán y excelente recuperación ante el clorpirifos, aunque fue inhibida por el clorotalonil. En general, las cepas evaluadas mostraron una capacidad notable para tolerar concentraciones elevadas de los plaguicidas, lo que sugiere su potencial para la degradación de contaminantes en suelos.

Este estudio presenta evidencia clara de que los hongos filamentosos pueden ser utilizados como agentes para la biorremediación en suelos contaminados por pesticidas. La identificación de cepas con alta tolerancia y capacidad de degradación ofrece nuevas posibilidades para desarrollar estrategias sostenibles en la gestión de la contaminación agrícola. No obstante, se sugiere realizar más investigaciones para entender mejor los mecanismos de degradación y cómo interactúan estos hongos con otros microorganismos presentes en el ecosistema del suelo.

9 METODOLOGÍA

Objetivo de la Revisión

Esta revisión narrativa tiene como objetivo analizar y sintetizar la literatura existente sobre el potencial de los hongos para la degradación de agrotóxicos, destacando sus mecanismos, eficacia y aplicaciones prácticas.

Criterios de Selección

Para asegurar una revisión rigurosa y relevante, se establecieron los siguientes criterios de selección:

- **Tipos de Estudios:** Se incluyeron estudios experimentales originales, revisiones sistemáticas, estudios de caso y artículos de revisión que investigan el uso de hongos ligninolíticos, mecanismos enzimáticos, rutas metabólicas y otros hongos con capacidades de biorremediación en la degradación de diferentes tipos de agrotóxicos. Este enfoque multidisciplinario permite incluir un amplio espectro de metodologías y resultados que aportan a una visión más completa del tema.
- **Fechas de publicación:** Se consideraron estudios publicados en los últimos 24 años, comprendiendo un periodo desde 2000 hasta 2024. Esta selección temporal asegura que se incluya tanto investigaciones pioneras como desarrollos recientes en el campo, reflejando así tanto la evolución como las tendencias actuales en la investigación de biorremediación.
- **Idiomas:** Para maximizar la inclusividad y representación de diferentes enfoques científicos, se incluyeron estudios publicados en inglés, español y portugués. Esta selección permite cubrir una amplia gama de investigaciones de diferentes regiones del mundo, especialmente de América Latina, donde la investigación sobre biorremediación es particularmente relevante.
- **Áreas Geográficas:** No se impusieron restricciones geográficas, permitiendo una perspectiva global del tema. Esta elección garantiza que se aborden contextos y ecosistemas variados, lo cual es crucial para comprender la aplicabilidad y adaptabilidad de los hongos en diferentes escenarios ambientales.

Fuentes de Información

Las fuentes de información fueron seleccionadas para cubrir un rango

amplio de literatura científica. Se realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos reconocidas por su relevancia y calidad en la publicación de estudios científicos, tales como:

- PubMed: Base de datos principal para literatura en ciencias biomédicas y biológicas.
- Google Scholar: Fuente integral que incluye literatura académica en diversas disciplinas.
- Web of Science: Base de datos multidisciplinaria que permite el acceso a artículos de alta calidad revisados por pares.
- SciELO: Especialmente relevante para estudios publicados en América Latina.
- Science Direct: Proveedor de acceso a investigaciones en ciencias aplicadas y ambientales.
- ResearchGate: Red social académica que permite acceso a artículos y tesis, facilitando el contacto directo con los autores para obtener datos adicionales.

Palabras Clave y Estrategias de Búsqueda

Para identificar los estudios relevantes, se utilizaron combinaciones estratégicas de palabras clave, orientadas a maximizar la sensibilidad y especificidad de los resultados de búsqueda. Las palabras clave incluyeron:

- "Biorremediación": para cubrir el ámbito general de la restauración ambiental mediante organismos vivos.
- "Hongos ligninolíticos", "Hongos filamentosos" y "Lignina": para enfocar en las capacidades específicas de estos hongos en la biodegradación.
- "Degradación de agrotóxicos", "Contaminación por pesticidas", "Fungicidas", "Pesticidas": para encontrar estudios que abordan específicamente los tipos de contaminantes de interés.
- "Biodegradación", "Biorremediación de lignina": para incluir artículos sobre mecanismos generales y específicos de degradación.

10 RESULTADOS

La revisión de estudios sobre la biodegradación de plaguicidas mediante hongos muestra que especies como *Phanerochaete chrysosporium* y *Bjerkandera adusta*, ambos hongos de pudrición blanca, son muy efectivas en la degradación de compuestos organofosforados y organoclorados. Esto es posible gracias a la producción de enzimas ligninolíticas como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa. Además, otros hongos como *Candida tropicalis* y *Stenotrophomonas maltophilia* también han demostrado eficacia en la remediación de suelos agrícolas contaminados.

Además de los hongos ligninolíticos, los hongos entomopatógenos también han demostrado un gran potencial en la remediación de suelos contaminados. Swathy et al. (2024) señalan que estos hongos pueden degradar insecticidas y herbicidas mediante la acción de enzimas oxidoreductasas. Por otro lado, Sánchez et al. (2015b) investigaron la tolerancia de hongos filamentosos, como *Fusarium sp.*, a plaguicidas como el endosulfán, clorpirifos y clorotalonil. Encontraron que algunas cepas de *Fusarium* presentan una notable capacidad de recuperación tras la exposición a estos compuestos, lo que las convierte en candidatas prometedoras para la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas.

Todos los estudios coinciden en el gran potencial que tienen los hongos para la biorremediación ambiental, aunque es necesario seguir investigando para mejorar y optimizar estos procesos a fin de aplicarlos de manera más efectiva en condiciones reales de campo. El uso de estos hongos podría ser clave para mitigar la contaminación por plaguicidas, presentándose como una estrategia sostenible para gestionar suelos y aguas contaminadas.

Las especies de hongos identificadas son fundamentales por sus propiedades metabólicas y enzimáticas. Entre las más efectivas para la degradación de plaguicidas se destacan:

Phanerochaete chrysosporium: Aparece en múltiples estudios, conocida por su alta eficiencia en degradar insecticidas organofosforados como el malatión y el paratión, a través de su sistema enzimático ligninolítico.

Bjerkandera adusta: Utilizada en investigaciones sobre la degradación de plaguicidas y materiales lignocelulósicos, destacándose por la producción de lignina peroxidasa (LiP) y manganeso peroxidasa (MnP).

Candida tropicalis y *Stenotrophomonas maltophilia*: Estas especies, cuando se usan en consorcio, han logrado una biodegradación efectiva de plaguicidas organofosforados y organoclorados en estudios experimentales.

Especie de Hongo	Mecanismo (Enzimas)	Pesticida/Compuesto Biodegradado	Autor del Artículo
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lignina peroxidasa (LiP), Manganese peroxidasa (MnP)	Malatión, Paratión, Clorpirifos	(MOHAPATRA; RATH; MOHAPATRA, 2018)
<i>Bjerkandera adusta</i>	Lignina peroxidasa (LiP), Manganese peroxidasa (MnP)	Lignocelulosa, Pesticidas	(D; GUMERSINDO; R, 2006b)
<i>Candida tropicalis</i>	Enzimas oxidativas y deshidrogenasas:	Malatión, Aldrín, Lindano	(CASTELLANOS et al., 2021)
<i>Bjerkandera sp. BOL 13</i>	Lacasa	Rojo Reactivo 2, Azul Reactivo 4	(CHÁVEZ et al., 2013)
<i>Galerina sp.</i>	Lacasa	Tintes industriales	(CHÁVEZ et al., 2013)
Hongos entomopatógenos (no especificados)	Oxidoreductasas	Insecticidas y Herbicidas	(SWATHY et al., 2024)
Hongos de pudrición blanca (diversos)	Lignin peroxidasa (LiP), Manganese peroxidasa (MnP), Lacasa	Insecticidas organofosforados, otros xenobióticos	(TORRES-FARRA DÁ et al., 2024)

Tabla 2. Algunos de los tipos/especies de hongos, sus mecanismos y compuesto degradado.

Los estudios revisados subrayan la capacidad de los hongos para degradar compuestos tóxicos mediante la producción de enzimas ligninolíticas. La lignina peroxidasa (LiP), manganese peroxidasa (MnP) y lacasa son los principales actores en estos procesos. Los hongos de pudrición blanca, como *Phanerochaete chrysosporium*, se destacan como los

más eficaces para la remediación ambiental. Además, se observa que la optimización de condiciones (temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes) juega un rol fundamental en el éxito de los procesos de biodegradación.

A pesar de que muchos estudios coinciden en el potencial de los hongos para la biodegradación, existen diferencias en la eficacia de las especies y las enzimas producidas en función de los contaminantes y las condiciones ambientales. Por ejemplo, algunos estudios informan de una menor eficiencia en la degradación de plaguicidas específicos como el clorotalonil y el forato, lo que sugiere que no todos los hongos tienen el mismo potencial para diferentes compuestos (Sánchez et al. 2015).

Los estudios revisados coinciden en que los hongos tienen un gran potencial en la biorremediación ambiental, aunque se necesitan más investigaciones para optimizar estos procesos y aplicarlos en condiciones de campo. El uso de estos hongos puede contribuir significativamente a mitigar la contaminación por plaguicidas, proporcionando una estrategia sostenible para la gestión de suelos y aguas contaminadas.

11 DISCUSIÓN

La biodegradación de plaguicidas y otros contaminantes mediante hongos ligninolíticos, en especial los hongos de pudrición blanca, ha demostrado ser una alternativa prometedora a las técnicas tradicionales de remediación, los cuales son procesos como excavación de la tierra o uso de otros compuestos químicos. Los estudios revisados revelan una considerable capacidad de estos organismos para degradar compuestos altamente tóxicos, empleando principalmente enzimas ligninolíticas como lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP) y lacasa. Estas enzimas actúan rompiendo los enlaces de moléculas recalcitrantes como los plaguicidas organofosforados y organoclorados, transformándolos en compuestos menos tóxicos o inofensivos para el ambiente.

En estudios revisados, *Trametes versicolor* ha mostrado ser altamente efectivo en la degradación de pesticidas hidrofóbicos como el clorpirifos, el dicofol y la cipermetrina. Según Hu *et al.* (2020), este hongo puede eliminar más del 90% de estos contaminantes bajo condiciones controladas, superando a otras especies ligninolíticas en eficiencia. Esto lo convierte en un candidato viable para aplicaciones de biorremediación a gran escala, especialmente en suelos agrícolas y cuerpos de agua afectados por el uso excesivo de pesticidas. Lo que distingue a *Trametes versicolor* es su versatilidad enzimática, destacándose no solo por su producción de lacasa, sino también por otras enzimas oxidativas que permiten la ruptura de enlaces en compuestos altamente tóxicos y persistentes. La lacasa juega un papel crucial en la oxidación de una amplia gama de compuestos orgánicos, incluyendo plaguicidas y contaminantes industriales, lo que convierte a *T. versicolor* en una herramienta prometedora para la remediación ambiental.

Phanerochaete chrysosporium, una de las especies de hongos más estudiadas, ha sido particularmente efectiva en la degradación de plaguicidas organofosforados como el malatión y el paratión. En el estudio de MOHAPATRA *et al.* (2018), *P. chrysosporium* mostró una alta capacidad para biodegradar estos compuestos, gracias a la producción de LiP y MnP, lo que sugiere su amplio potencial en estrategias de biorremediación en suelos contaminados con pesticidas. Este hallazgo coincide con lo señalado por DÍAZ Y CARLOS (2011), quienes subrayan que los hongos de pudrición blanca son eficaces en la degradación de compuestos xenobióticos debido a su diversidad enzimática.

Otra especie de gran relevancia es *Bjerkandera adusta*, que también ha demostrado ser altamente eficiente en la producción de LiP y MnP para la degradación de

materiales lignocelulósicos y plaguicidas. (D; GUMERSINDO; R, 2006) evaluaron su capacidad para descomponer sustratos sólidos, concluyendo que *B. adusta* tiene aplicaciones significativas en la biorremediación de contaminantes.

En cuanto a la biodegradación de plaguicidas organoclorados, *Candida tropicalis* y *Stenotrophomonas maltophilia* han sido identificadas como especies con un notable potencial. CASTELLANOS ET AL. (2021) observaron que *C. tropicalis* alcanzó una alta densidad celular y una eficiencia destacada en la degradación de plaguicidas como el aldrín y el lindano, superando a otras cepas bacterianas en estudios experimentales. La combinación de *C. tropicalis* con *S. maltophilia* aumentó la eficiencia en la biodegradación, lo que sugiere que el uso de consorcios microbianos podría ser una estrategia efectiva en la remediación de suelos contaminados con múltiples tipos de pesticidas.

Sin embargo, no todos los hongos exhiben la misma capacidad de degradación frente a diferentes plaguicidas. SÁNCHEZ ET AL. (2015B) documentaron que, si bien *Fusarium sp.* K12P mostró una alta tolerancia al endosulfán y el clorpirifos, fue inhibido por el clorotalonil, lo que indica que la eficacia de la biodegradación puede depender del tipo de contaminante y las condiciones ambientales. Esto sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de cultivo y realizar estudios adicionales que exploren la interacción de diferentes especies de hongos y la variabilidad en su capacidad enzimática.

11.1 Limitaciones y Factores que Obstaculizan la Comercialización

A pesar del gran potencial que presentan los hongos ligninolíticos para la biorremediación, existen varias razones por las cuales no se han comercializado ampliamente para su uso en suelos y aguas contaminadas. Una de las principales limitaciones es la falta de estandarización y optimización de las condiciones necesarias para que estos hongos operen de manera eficiente en el ambiente natural. En muchos casos, los estudios exitosos se han llevado a cabo bajo condiciones de laboratorio controladas, donde factores como la temperatura, pH y nutrientes están optimizados (DÍAZ Y CARLOS, 2011; MOHAPATRA *et al.*, 2018). Sin embargo, cuando estos hongos son transferidos a entornos no controlados, como suelos agrícolas o cuerpos de agua, la efectividad de la biodegradación puede reducirse significativamente debido a condiciones subóptimas.

Otro factor que limita la comercialización es la variabilidad en la respuesta de los hongos a diferentes contaminantes. Como se observó en el caso de *Fusarium sp.* (Sánchez et al., 2015b), algunos hongos pueden ser eficaces frente a ciertos plaguicidas pero no

responder igual frente a otros, lo que restringe su aplicabilidad general. Además, la interacción con otros microorganismos en el ecosistema también puede afectar la actividad de los hongos, lo que añade un nivel de complejidad a su uso en campo.

Asimismo, la escalabilidad de estos métodos representa otro desafío importante. La producción masiva y distribución de hongos para aplicaciones de biorremediación requiere infraestructura y tecnologías que aún no están completamente desarrolladas para su uso a gran escala. Aunque los consorcios microbianos y los sistemas enzimáticos fúngicos han demostrado gran promesa, el costo y la logística de implementarlos a nivel comercial en suelos y cuerpos de agua extensos siguen siendo altos.

11.2 Condiciones Óptimas para la Biorremediación

Para maximizar el potencial de los hongos en la biorremediación, es crucial asegurar que se alcancen las condiciones óptimas de crecimiento y actividad enzimática. Según MOHAPATRA ET AL. (2018), factores como la temperatura, el pH, y la disponibilidad de nutrientes son determinantes para la producción de enzimas ligninolíticas y la eficiencia de la degradación. Los hongos como *Phanerochaete chrysosporium* requieren un rango de pH de 4 a 5 para maximizar la actividad de la lignin peroxidasa, mientras que la manganosa peroxidasa se activa en condiciones con suficiente manganeso disponible en el medio.

Además, la aireación es fundamental, ya que muchos de estos procesos enzimáticos dependen de la disponibilidad de oxígeno para completar las reacciones de degradación. En estudios donde se ha optimizado la aireación, se ha observado una mejora significativa en la eficiencia de degradación de compuestos tóxicos, como los organofosforados y organoclorados (CHÁVEZ ET AL., 2013). La incorporación de consorcios microbianos también puede aumentar la efectividad de la biorremediación al crear un ambiente más diverso y sinérgico, como lo indican CASTELLANOS ET AL. (2021).

Finalmente, la adición de ciertos cofactores o agentes quelantes como el EDTA ha demostrado mejorar la eficiencia de la biodegradación en algunos casos, al aumentar la solubilidad de los pesticidas o mejorar la reutilización de las enzimas ligninolíticas (CHÁVEZ ET AL., 2013). Estas intervenciones podrían ser clave para optimizar el uso de hongos en aplicaciones comerciales.

En comparación con otros hongos con capacidad de biodegradación, los hongos ligninolíticos, especialmente los hongos de pudrición blanca, han sido objeto de un mayor número de estudios. Esto se debe principalmente a su sistema enzimático ligninolítico, compuesto por lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP) y lacasa, que los convierte en candidatos ideales para la degradación de una amplia gama de compuestos recalcitrantes. Investigaciones como las de MOHAPATRA *et al.* (2018) Y DÍAZ Y CARLOS (2011) destacan que los hongos ligninolíticos tienen un mayor potencial documentado para la degradación de plaguicidas organofosforados y organoclorados, en comparación con otras especies que también poseen capacidad de biodegradación, como hongos entomopatógenos o hongos filamentosos.

A pesar de que otros hongos como *Fusarium sp.* y *Candida tropicalis* han demostrado eficacia en la degradación de ciertos pesticidas (Sánchez *et al.* 2015b, Castellanos *et al.* 2021), su mecanismo de acción enzimático no ha sido tan ampliamente estudiado o caracterizado como el de los hongos ligninolíticos. Este enfoque preferencial hacia los hongos ligninolíticos ha limitado, en cierta medida, el desarrollo y la comprensión de los potenciales mecanismos enzimáticos alternativos presentes en otros grupos de hongos, que también podrían ser eficaces para la biorremediación si se estudiarán con mayor profundidad.

12 CONCLUSIÓN

Los hongos ligninolíticos, especialmente las especies de pudrición blanca como *Phanerochaete chrysosporium* y *Bjerkandera adusta*, han demostrado ser agentes biológicos efectivos para la biorremediación de plaguicidas y otros contaminantes en suelos y aguas. A través de la producción de enzimas clave como lignina peroxidasa (LiP), manganeso peroxidasa (MnP) y lacasa, estos hongos son capaces de degradar compuestos tóxicos como los plaguicidas organofosforados, organoclorados y tintes industriales, transformándolos en productos menos dañinos para el medio ambiente.

Sin embargo, aunque los resultados de laboratorio han sido prometedores, la aplicación comercial de estos hongos en la biorremediación aún enfrenta varios desafíos. Las principales limitaciones incluyen la necesidad de optimizar las condiciones de cultivo y degradación en entornos naturales, donde factores como la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes pueden afectar la actividad enzimática. Además, la falta de estandarización de protocolos y la escalabilidad de estos procesos en entornos a gran escala

limitan su implementación en el campo. Y aunque *Trametes versicolor* ha mostrado un gran potencial en la degradación de pesticidas hidrofóbicos, su aplicación comercial aún enfrenta desafíos. Se requiere más investigación para optimizar sus condiciones de uso en campo y para superar las barreras logísticas que impiden su comercialización. A medida que se realicen más estudios a gran escala y se validen sus resultados en condiciones reales, es probable que este hongo juegue un papel clave en las estrategias sostenibles de remediación ambiental.

A pesar de estas barreras, los avances en la investigación sugieren que la combinación de hongos con otros microorganismos en consorcios biológicos puede mejorar significativamente la eficiencia de la biorremediación. Se requiere más investigación en condiciones de campo para validar los hallazgos de laboratorio y desarrollar soluciones comerciales viables. Si se superan estos desafíos, los hongos ligninolíticos podrían desempeñar un papel clave en las estrategias sostenibles para la remediación de suelos y aguas contaminadas, contribuyendo a la mitigación de la contaminación ambiental y promoviendo prácticas agrícolas e industriales más sostenibles

12 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO PARANÁ. BOLETIM INFORMATIVO – CADASTRO DE AGROTÓXICOS 2024 – 1º/SEMESTRE ADAPAR.. DISPONÍVEL EM: <[HTTPS://WWW.ADAPAR.PR.GOV.BR/SITES/ADAPAR/ARQUIVOS_RESTRITOS/FILES/DOCUMENTO/2024-09/BOLETIM_INFORMATIVO_1_2024.PDF](https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2024-09/boletim_informativo_1_2024.pdf)>. ACESSO EM: 8 OUT. 2024.

ARREGUI, L. et al. Laccases: structure, function, and potential application in water bioremediation. **Microbial Cell Factories**, v. 18, n. 1, 14 nov. 2019.

ARROYAVE, S. M. S.; RESTREPO, F. J. C. Análise da contaminação da terra: revisão da normativa e das possibilidades de regulamento econômico. **Semestre Económico**, v. 12, n. 23, p. 13-34, 1 jan. 2009a.

ATIWESH, G. et al. Lignin degradation by microorganisms: A review. **Biotechnology Progress**, v. 38, n. 2, 9 dez. 2021.

BASSO, C.; SIQUEIRA, A. C. F.; RICHARDS, N. S. P. D. S. Impactos na saúde humana e no meio ambiente relacionados ao uso de agrotóxicos: Uma revisão integrativa. **Research Society And Development**, v. 10, n. 8, p. e43110817529, 15 jul. 2021.

CAMACHO-MORALES, R. L. et al. Producción de enzimas ligninolíticas durante la degradación del herbicida paraquat por hongos de la pudrición blanca. **Revista Argentina de Microbiología**, v. 49, n. 2, p. 189-196, 1 abr. 2017.

CARDONA, J. A. C. Experto en Medicina Tropical. [s.l.] Editorial Medica Panamericana, 2022. **Micología Módulo 5**

CASTELLANOS, J. L. H. et al. BIODEGRADACIÓN DE PLAGUICIDAS ORGANOFOSFORADOS Y ORGANOCORADOS POR *Candida tropicalis* Y *Stenotrophomonas maltophilia* EN MICROCOSMOS DEL SUELO. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, 8 nov. 2021.

CHÁVEZ, G. et al. Potencial de cepas fúngicas aisladas en el área de Biotecnología Fúngica. Primera parte: Uso de hongos en biorremediación. **Revista CON-CIENCIA**, v. 1, n. 1, p. 85-91, 1 out. 2013.

COLORADO, B. E. J.; TOBÓN, A. B.; BALLESTAS, I. T. Bacterias degradadoras de pesticidas organofosforados presentes en suelos contaminados. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 25, n. 3, p. 13-22, 13 out. 2016a.

CONSUELO, S. L. L. Importancia de las enzimas Lignina Peroxidasa (Lip) y Manganese Peroxidasa (Mnp) en la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes de curtiembres. Disponível em: <<https://repositorio.unicolmayor.edu.co/handle/unicolmayor/6513>>. fecha de acesso dia 15 de

agosto, 2023.

CORDOBA, R.; CULTID, G. Estudio comparativo de la actividad enzimática de lacasa (lac), lignina peroxidasa (lip) y manganeso peroxidasa (mnp) de “pleurotus ostreatus” cultivado en residuos lignocelulósicos de raquis de palma de aceite, bagazo de fique y pulpa de café. [s.l.] **Universidad de Nariño**, 1 jan. 2015.

COVARRUBIAS, S. A.; BERUMEN, J. A. G.; CABRIALES, J. J. P. Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals. **Acta Universitaria**, v. 25, n. NE-3, p. 40-45, 1 out. 2015.

D, J. C. Q.; GUMERSINDO, F. C.; R, J. M. L. PRODUCCIÓN DE ENZIMAS LIGNINOLÍTICAS CON HONGOS BASIDIOMICETOS CULTIVADOS SOBRE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS. **VITAE, REVISTA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA FARMACÉUTICA**, v. 13, n. 2, p. 61-67, 1 jan. 2006a.

DÍAZ, Q.; CARLOS, J. Revisión: Degradación de plaguicidas mediante hongos de la pudrición blanca de la madera. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 64, n. 1, p. 5867-5882, 1 jan. 2011.

DUKE, S. O.; POWLES, S. B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 319-325, 13 fev. 2008.

GARZÓN, J. M.; MIRANDA, J. P. R.; GÓMEZ, C. H. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. **Universidad y Salud**, v. 19, n. 2, p. 309, 30 ago. 2017.

GAYLARDE, C. C; BELLINASO, M. L. Aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, v. 34, p. 37-43, 2005.

GOMEZ DELGADO, N. M.; SÁNCHEZ CUESTA, T. C. Revisión de eficiencia de hongos ligninolíticos en la biodegradación y adsorción de los metales pesados en aguas residuales textiles. Tesis de Grado—[s.l.] **UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**, 2018.

GÓMEZ, S. G. Hongos filamentosos potencialmente degradadores de caucho de neumático colectados en la vía Bogotá- Fusagasugá, Colombia. [s.l.] **PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**, 14 nov. 2019.

HERNÁNDEZ-RUIZ, G. M. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v. 18, n. 1, p. 139, 27 dez. 2016.

HU, K. et al. Exploring the degradation capability of *Trametes versicolor* on selected hydrophobic pesticides through setting sights simultaneously on culture broth and biological matrix. **Chemosphere**, v. 250, p. 126293, 1 jul. 2020.

INAGAKI, M. N.; JUNQUEIRA, C. P.; BELLON, P. P. DESAFIOS DA PRODUÇÃO DE SOJA ORGÂNICA COMO DETERMINANTE À IMPLANTAÇÃO DE SEU CULTIVO PARA FINS COMERCIAIS NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 682, 2018.

KHATOON, N.; JAMAL, A.; ALI, M. I. Polymeric pollutant biodegradation through microbial oxidoreductase: A better strategy to safe environment. **International Journal Of Biological Macromolecules**, v. 105, p. 9-16, 1 dez. 2017.

LOPES, C. V. A.; DE ALBUQUERQUE, G. S. C. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde Em Debate**, v. 42, n. 117, p. 518-534, 1 jun. 2018.

MARTÍNEZ CANO, B.; SOTO ZARAZÚA, M. G. Microorganismos benéficos o agroquímicos. **Elementos**, v. 128, p. 57-63, 2022.

MOHAPATRA, D.; RATH, S. K.; MOHAPATRA, P. K. Bioremediation of Insecticides by White-Rot Fungi and Its Environmental Relevance. En: **Fungal biology**. p. 181-212, 2018.

MORENO, A. D. et al. Laccases as versatile enzymes: from industrial uses to novel applications. **Journal Of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 95, n. 3, p. 481-494, 4 nov. 2019a.

MUÑIZ-VALENCIA, R. et al. Determinación de plaguicidas en suelo agrícola mediante extracción en fase sólida y cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC) acoplada a un detector de arreglo de diodos (DAD). **Acta Universitaria**, v. 29, p. 1-14, 13 nov. 2019a.

NACIONES UNIDAS CONVENCIÓN DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN. **Perspectiva global de la Tierra**. 1. ed. Alemania: 2017.

PALOMINO PARIONA, E. Biorremediación con Hongos y Bacterias en suelo contaminados con Pesticidas 2022: Revisión Sistémica. Tesis de Grado— **Universidad Cesar Vallejo**, 2022.

PIENIKA, R. TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE AGROQUÍMICOS EN CULTIVOS EXTENSIVOS. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2010. **Proyecto FPTA-260- Optimización de la tecnología de aplicación terrestre en cultivos extensivos**

PIGNATI, W. A. et al. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 10, p. 3281-3293, 1 out. 2017a.

QUINTERO D, J. C.; GUMERSINDO, F. C.; LEMA R, J. M. PRODUCCIÓN DE ENZIMAS LIGNINOLÍTICAS CON HONGOS BASIDIOMICETOS CULTIVADOS SOBRE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS. **Vitae**, v. 13, p. 61-67, 2006.

RE, D.; VERÓNICA, C. Relevamiento de cepas argentinas de hongos ligninolíticos para su aplicación en procesos biotecnológicos ligados a la industria celulósico-papelera. Tesis doctoral—[s.l.] **Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.**, 15 abr. 2016.

SÁNCHEZ, K. S. et al. Tolerancia de hongos filamentosos a endosulfán, clorpirifós y clorotalonil en condiciones in vitro. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v. 31, n. 1, p. 23-37, 22 jan. 2015a.

SANTOS, J. A. D.; MARJOTTA-MAISTRO, M. C. Principais ingredientes ativos dos agroquímicos: aplicação e uso no Brasil. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/17857>>. Consultado dia 15 de agosto, 2024

SOUZA, J. L. D. Principais ingredientes ativos dos agroquímicos: aplicação e uso no Brasil. [s.l.] **Universidade Federal de São Carlos**, 2023.

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. e23406, 1 jan. 2024.

TORRES RODRÍGUEZ, D. El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. **Ecosistemas**, 2003.

TORRES-FARRADÁ, G. et al. White Rot Fungi as Tools for the Bioremediation of Xenobiotics: A Review. **Journal Of Fungi**, v. 10, n. 3, p. 167, 21 fev. 2024.

VALDERRAMA, J. F. N.; BAENA, J. A. P.; PÉREZ, F. J. M. PERSISTENCIA DE PLAGUICIDAS EN EL AMBIENTE Y SU ECOTOXICIDAD: UNA REVISIÓN DE LOS PROCESOS DE DEGRADACIÓN NATURAL. **DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals)**, 1 set. 2012.

VIZUETE-GARCÍA, R. A. et al. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. **Revista Lasallista de Investigación**, v. 17, n. 1, p. 177-187, 24 ago. 2020.