Potencial de *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos en la biodegradación de colorantes sintéticos en sistemas acuáticos del sector textil: una revisión sistemática de la literatura.

Autores:
Mariana López López
Paul Andrés Ospina Caviedes

Título por el que opta:
Microbiólogo

Director:
Alexis Gafaro Montejo

Grupo de Investigación:
GIMIA

Línea de Investigación:
Microbiología ambiental

Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Microbiología
Universidad Santiago de Cali
Santiago de Cali - Colombia
2026

IMPACTOS

Relacione el (los) impacto(s) que presentó el Trabajo de Grado según los siguientes criterios:

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Propuesta de un método biotecnológico de bajo costo para la remoción de colorantes sintéticos en aguas residuales del sector textil mediante el uso del hongo *Trametes versicolor*	Sector textil, plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), Sector industrial que busca reducir costos de tratamiento.
Científico	Generación de conocimiento sobre la capacidad degradativa de *Trametes versicolor* y su sistema enzimático ligninolítico (lacasas y peroxidasas) aplicado a la degradación de colorantes textiles	Comunidad científica, investigadores en microbiología ambiental, estudiantes y universidades
Tecnológico	Desarrollo de una estrategia biotecnológica basada en micorremediación para el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes sintéticos	Industria textil, sector ambiental, entidades encargadas del manejo y tratamiento de aguas residuales

Potencial de *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos en la biodegradación de colorantes sintéticos en sistemas acuáticos del sector textil: una revisión sistemática de la literatura.

Mariana López López (mariana.lopez02@usc.edu.co) ; Paul Andrés Ospina Caviedes (paul.ospina00@usc.edu.co)

Grupo de Investigación en Microbiología, Industria y Ambiente GIMIA., Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia.

RESUMEN

Esta monografía aborda el estudio del potencial de *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos en la biodegradación de colorantes sintéticos en sistemas acuáticos del sector textil. La investigación bajo los lineamientos metodológicos PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). La búsqueda se realizó en bases de datos científicas especializadas, integrando publicaciones en inglés y español correspondientes al período 2016–2025; Inicialmente, se identificaron, 4,985 artículos. Tras la eliminación de 2,685 registros duplicados mediante el uso de Mendeley, se obtuvo u total de 2,300 estudios únicos. Posteriormente, durante la revisión de títulos, se excluyeron 1,750 artículos directamente por el título. Quedando así, 550 artículos para evaluación. De estos, 320 fueron descartados debido a la falta de acceso al texto completo. Finalmente, se evaluaron 230 artículos a texto completo, de los cuales se excluyeron 200 por no cumplir con los criterios específicos del estudio. Quedando así, 30 artículos.

Los resultados evidencian que *Trametes versicolor* en la biodegradación de colorantes sintéticos presentes en aguas residuales, posee una elevada capacidad para degradar colorantes sintéticos gracias a la acción de enzimas ligninolíticas como lacasas, mangameso peroxidasas y lignina peroxidasa, las cuales permiten la ruptura de la estructura aromática compleja presentes en estos compuestos. Diversos estudios reportan porcentajes de remoción superiores al 80% en diferentes tipos de colorantes, incluyendo azoicos, antraquinónicos y reactivos. Por lo cual, se oncluye que *Trametes versicolor* representa una alternativa viable para el tratamiento de efluentes textiles, debido a su elevada capacidad enzimática, adaptabilidad a distintos ambientes y potencial aplicación en procesos de biorremediación ambiental. Sin embargo, se identifican desafíos relacionados con la escalabilidad industrial, la optimización de condiciones ambientales y la integración de estos sistemas con las tecnologías convencionales utilizadas hoy en día en el proceso de tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: *biodegradación, aguas residuales textiles, colorantes sintéticos, biorremediación, Trametes versicolor*

The Potential of Trametes versicolor for the Biodegradation of Synthetic Dyes in Urban Wastewater from the Textile Sector in Colombia: A Systematic Literature Review.

ABSTRACT

This monograph examines the potential of Trametes versicolor and its ligninolytic enzyme systems in the biodegradation of synthetic dyes in aquatic systems within the textile industry. The research was conducted in accordance with the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) methodological guidelines. The search was performed in specialized scientific databases, including publications in English and Spanish from the period 2016–2025; initially, 4,985 articles were identified. After removing 2,685 duplicate records using Mendeley, a total of 2,300 unique studies were obtained. Subsequently, during the title review, 1,750 articles were excluded based solely on their titles. This left 550 articles for evaluation. Of these, 320 were discarded due to lack of access to the full text. Finally, 230 full-text articles were evaluated, of which 200 were excluded for failing to meet the study's specific criteria. This left 30 articles.

The results show that Trametes versicolor exhibits a high capacity for biodegrading synthetic dyes present in wastewater, thanks to the action of ligninolytic enzymes such as laccases, mangameso peroxidases, and lignin peroxidase, which break down the complex aromatic structures found in these compounds. Various studies report removal rates exceeding 80% for different types of dyes, including azo, anthraquinone, and reactive dyes. Therefore, it is concluded that Trametes versicolor represents a viable alternative for the treatment of textile effluents, due to its high enzymatic capacity, adaptability to different environments, and potential application in environmental bioremediation processes. However, challenges have been identified regarding industrial scalability, the optimization of environmental conditions, and the integration of these systems with the conventional technologies currently used in the wastewater treatment process.

Keywords: *biodegradation, textile wastewater, synthetic dyes, bioremediation, Trametes versicolor*

HIGHLIGHTS

- Evaluación del potencial de *Trametes versicolor* para degradar colorantes sintéticos del sector textil.
- Identificación de enzimas ligninolíticas implicadas en la biodegradación de colorantes
- Análisis de estudios científicos sobre remoción de colorantes en aguas residuales textiles
- Evidencia de eficacias de decoloración superiores al 80% en diversos colorantes
- Potencial aplicación de hongos ligninolíticos en biorremediación de efluentes textiles

Potencial de *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos en la biodegradación de colorantes sintéticos en sistemas acuáticos del sector textil: una revisión sistemática de la literatura.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria textil representa una de las principales causas de contaminación en el planeta, debido a su masiva producción de tintes, pigmentos y químicos residuales que se generan durante los procesos de manufactura, estos procesos demandan mucho uso de agua debido a que 1kg de textil que se tiñe se necesita 100L de agua, lo que genera un afluente de agua contaminado con tinte que termina en los ríos generando contaminación al ecosistema acuático como ríos, donde su flora y fauna se ve afectada al reducir la transmisión del sol evitando que los organismos realicen procesos fotosintéticos necesarios para su metabolismo. La composición química de los tintes es relevante porque ahí se encuentra la razón por la cual son difíciles de degradar, por ejemplo, los tintes fabricados de azoles contienen una doble capa de átomos de nitrógeno, adicionalmente de grupos sulfatos. También se ha encontrado que algunos tintes tienen efectos carcinogénicos causando múltiples complicaciones como: irritación en la piel, sensibilización de la piel y cáncer, como se mencionó anteriormente. Las técnicas que se usaban para degradar estos tintes han resultado obsoletas a través del tiempo, evidenciando que muchos de estos procesos no son lo suficientemente eficientes e incluso, los productos de las degradaciones derivan más tóxicos que sus precedentes, económicamente suelen ser desfavorables por los costos y la poca rentabilidad que presentan estos procesos. Mientras que, el uso de métodos biológicos ha representado una mayor rentabilidad, al ser económicos y amigables con el medio ambiente, estos métodos incluyen el uso de microorganismos capaces de degradar los tintes, que suelen usar mecanismos de acción por medio de sus enzimas intracelulares y extracelulares, como lo son los hongos ligninolíticos. (Fayyaz et al., 2025)

Los hongos ligninolíticos poseen un sistema de tres enzimas: lacasa, lignina peroxidasa (LiP) y manganeso peroxidasa (MnP). Las lacasas son enzimas extracelulares producidas principalmente por hongos degradadores de madera y de pudrición blanca, participan en la degradación de la lignina y compuestos aromáticos, al degradarla y facilitar la entrada de otras enzimas como la hemicelulosa y celulosa. Otras enzimas pueden catalizar la degradación de compuestos aromáticos, como LiP y MnP, que suelen ser utilizadas en las etapas iniciales de degradación de la lignina (como MnP) y la degradación de anillos aromáticos. La actividad de degradación de colorantes textiles por hongos ligninolíticos ha mostrado una gran eficacia, sin embargo, cada cepa genera un perfil enzimático, basado en las variables ambientales y el diferente nivel de decoloración del colorante. Estos procesos enzimáticos muestran una tecnología prometedora para solucionar la contaminación causada por los colorantes textiles usando hongos ligninolíticos, como *Trametes versicolor*, uno de los hongos de pudrición blanca más estudiados debido a su alta capacidad enzimática, clasificado como basidiomiceto de pudrición blanca, produce enzimas ligninolíticas como ligninas y peroxidasas extracelulares que son eficientes para la degradación de lignina, permitiendo que actúen por fuera de la célula para romper estructuras aromáticas presentes en la lignina. Crece en la madera en

descomposición, se reconoce por sus cuerpos fructíferos en forma de abanico con bandas de distintos colores, de ahí se origina su nombre. Por su sistema enzimático tan eficaz es potencialmente utilizado en diversas aplicaciones biotecnológicas como la degradación de contaminantes recalcitrantes como el polímero de la lignina y el tratamiento de aguas residuales. (Plácido et al. (2016).

2. METODOLOGÍA

Este estudio se realizó utilizando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses); una guía para investigadores que permite la elaboración y documentación transparente de revisiones sistemáticas y metaanálisis bajo criterios de inclusión y exclusión, asegurando la recopilación de información relevante y de alta calidad (Page et al., 2020).

Tipo de estudio.

Es un estudio con un diseño tipo documental, ya que es fundamental en la recopilacion, analisis y sintesis de la literatura científica relacionada con Potencial de *Trametes versicolor* en la biodegradación de colorantes sintéticos en aguas residuales urbanas del sector textil en Colombia; del mismo modo, es de carácter descriptivo, debido a que expone los diferentes tipos de colorantes involucrados en la contaminación de aguas residuales del sector textil en colombia y los diferentes tipos de procesos que se llevan a cabo con las diferentes enzimas involucradas en este proceso de biorremediación.

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

Estrategia de búsqueda

La presente revisión sistemática se desarrolló siguiendo las directrices establecidas por los Elementos de Reporte Preferidos para Revisiones Sistemáticas y MetaAnálisis (PRISMA). Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica en cinco bases de datos científicas: Springer Nature Link, Web of Science, ScienceDirect, Nature y Scopus, seleccionadas por su amplio contenido en áreas como microbiología, biotecnología y ciencias ambientales. Esto permitió identificar estudios relevantes relacionados con el uso de *Trametes versicolor* en la biodegradación de colorantes sintéticos en aguas residuales del sector textil publicadas entre 2016 y 2026. La estrategia de búsqueda se fundamentó en el uso de combinaciones de palabras clave junto con operadores booleanos (AND, OR), asi como en el empleo de herramientas de búsqueda avanzada con las comillas (“ ”) y el asterisco (*), con el objetivo de obtener resultados más precisos y pertinentes. Las ecuaciones de búsqueda y combinaciones utilizadas se presentan en la **Tabla 1.**

Criterios de inclusión

- Artículos de investigación publicados entre 2016 y 2026 que aborden el Potencial de *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos en la biodegradación de colorantes sintéticos en aguas residuales del sector textil.
- Artículos en idioma inglés.
- Artículos indexados dentro de revistas con nivel de impacto Q1 y Q2 según SCIMAGO.
- Informes técnicos y libros especializados en procesos de biorremediación con hongos ligninolíticos que aporten información relevante al tema.

Criterios de exclusión

- Artículos que no mencionan el uso de hongos ligninolíticos.
- Estudios centrados exclusivamente en bacterias, algas u otros microorganismos sin incluir hongos.
- Investigaciones que analicen la degradación de contaminantes distintos a colorantes sintéticos textiles.
- Artículos que no presenten resultados experimentales o datos cuantificables sobre eficiencia de degradación, decoloración o actividad enzimática.
- Tesis de pregrado, resúmenes de congresos, cartas al editor y literatura gris que no cuenten con revisión por partes.

2.2. Proceso de selección de estudios.

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en las bases de datos previamente seleccionadas mediante el uso de palabras clave combinadas con operadores booleanos. Posteriormente, se desarrolló una frase de cribado en la que se revisaron los títulos y resúmenes de los artículos, aplicando los criterios de inclusión y exclusión establecidos. Durante este proceso también se identificaron y eliminaron los registros duplicados con apoyo de la herramienta de gestión bibliográfica Mendeley. En la etapa de elegibilidad, se realizó la lectura completa de los estudios preseleccionados con el fin de evaluar se pertinencia temática y rigor metodológico. Finalmente, aquellos artículos cumplieron con todos los criterios definidos fueron incluidos en el análisis final de la revisión sistemática.

2.3. Extracción y análisis de datos

Los datos extraídos de los estudios serán organizados y analizados con el fin de identificar tendencias relacionadas con el potencial de *Trametes versicolor* en la biodegradación de colorantes sintéticos presentes en aguas residuales del sector textil. Se evaluará la eficiencia en la remoción de estos compuestos, así como el papel de las enzimas ligninolíticas, especialmente las lacasas y peroxidasas, en los procesos de degradación. Esta información se presenta en tablas y gráficos, destacando los tipos de colorantes tratados, los porcentajes de decoración alcanzados, las condiciones experimentales empleadas y los factores ambientales que influyen en la actividad biológica del hongo. Asimismo, se identificarán vacíos de conocimiento en la literatura científica y se propondrán posibles líneas de investigación futura orientadas a la aplicación de *Trametes versicolor* en la biorremediación de aguas residuales en el contexto del sector textil colombiano.

3. RESULTADOS

3.1. Síntesis y análisis de los estudios incluidos

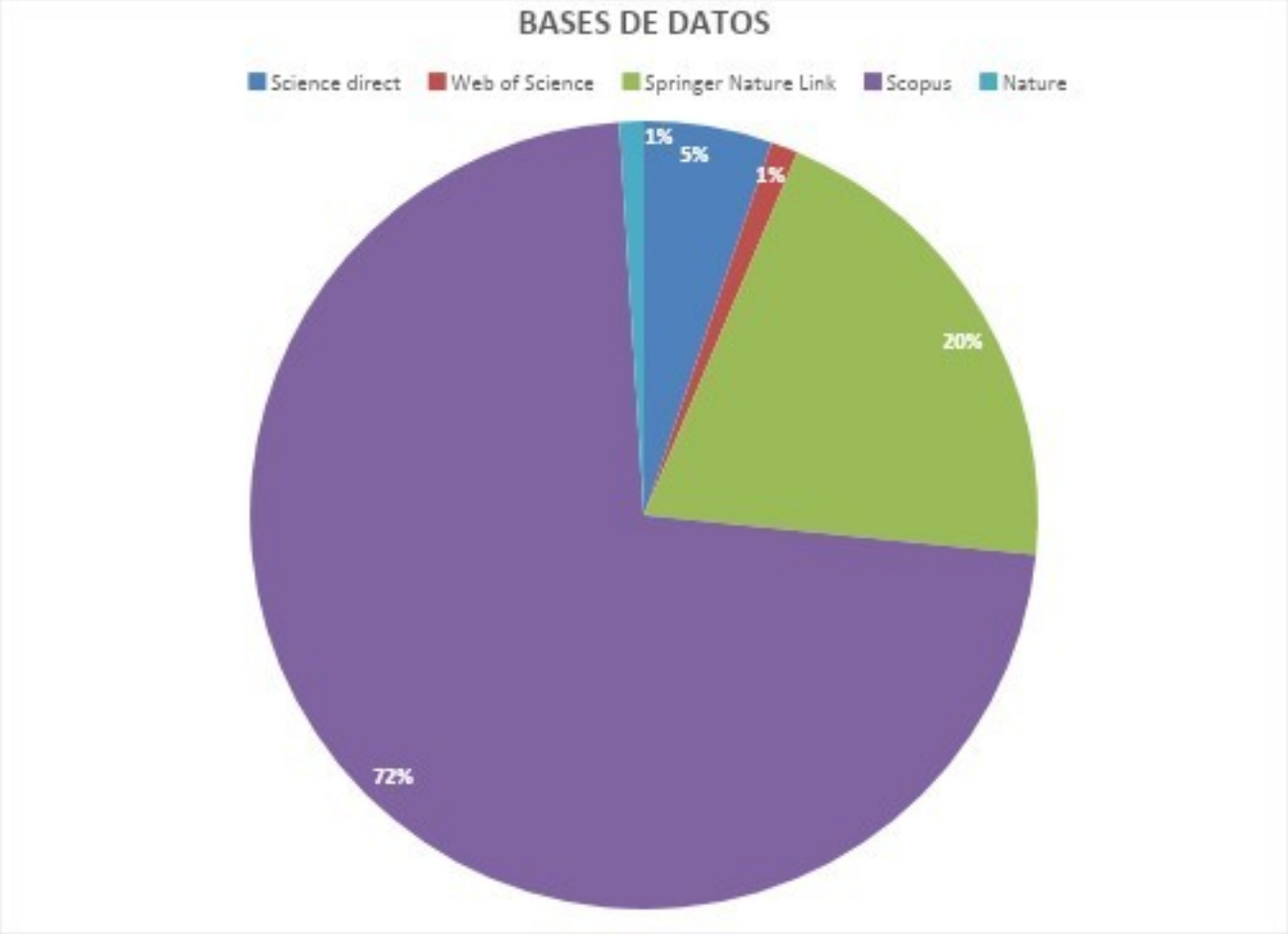
Para esta revisión se diseñaron diez ecuaciones de búsqueda, estructuradas con

operadores booleanos, aplicadas en las cinco bases de datos seleccionadas, conforme a lo descrito en la metodología. Los resultados obtenidos a partir de dichas combinaciones se presentan en la **tabla 1.**

Tabla 1. ***Combinaciones de las palabras claves con el uso de operadores booleanos.***

Combinaciones de palabras claves	**Science direct**	**Web of Science**	**Springer Nature Link**	**Scopus**	**Nature**	**Total de artículos por algoritmo de búsqueda**
"*Trametes versicolor*" AND "Biodegradation" AND "Synthetic dyes"	**47**	**10**	**181**	**648**	**9**	**895**
"*Trametes versicolor*" AND "Wastewater" AND "Decoloration"	**7**	**0**	**10**	**63**	**0**	**80**
"Biodegradation" AND "Wastewater" AND "*Trametes versicolor*"	**174**	**2**	**105**	**1,004**	**4**	**1,287**
"Synthetic dyes" AND "Wastewater" AND "Biorremediation"	**29**	**0**	**66**	**133**	**3**	**231**
Total de artículos por base de datos	**254**	**12**	**362**	**1,848**	**16**	

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Como resultado del proceso de búsqueda bibliográfica, se identificaron inicialmente 4,985 artículos en las bases de datos seleccionadas. Posteriormente, se procedió a la eliminación de registros duplicados mediante el uso del gestor bibliográfico Mendeley, lo que permitió depurar 2,685 documentos repetidos y obtener un total de 2,300 artículos únicos.

En la fase de cribado, se realizó la revisión de títulos, excluyéndose 1,750 artículos por no estar directamente relacionados con la temática de estudio, ya sea por abordar otros microorganismos, diferentes tipos de contaminantes o procesos no asociados a la biodegradación de colorantes textiles. Como resultado, 550 estudios fueron considerados potencialmente relevantes.

Durante la etapa de recuperación de información, se identificó que 320 artículos no contaban con acceso al texto completo, lo que limitó su inclusión en el análisis. En consecuencia, se dispuso de 230 artículos para su evaluación detallada a texto completo.

En la fase de elegibilidad, se aplicaron los criterios específicos del estudio, lo que condujo a la exclusión de 200 artículos por diversas razones: 55 estudios no empleaban *Trametes versicolor* como microorganismo de interés, 70 no abordaban la degradación de colorantes textiles y 75 no estaban relacionadas con aguas residuales.

Finalmente, un total de 30 artículos cumplieron con todos los criterios de inclusión establecidos y fueron seleccionados para el análisis final Estos estudios constituyen la base de la presente revisión sistemática, permitiendo evaluar de manera integral el potencial de *Trametes versicolor* en la biodegradación de colorantes sintéticos en aguas residuales del sector textil (Figura 1).

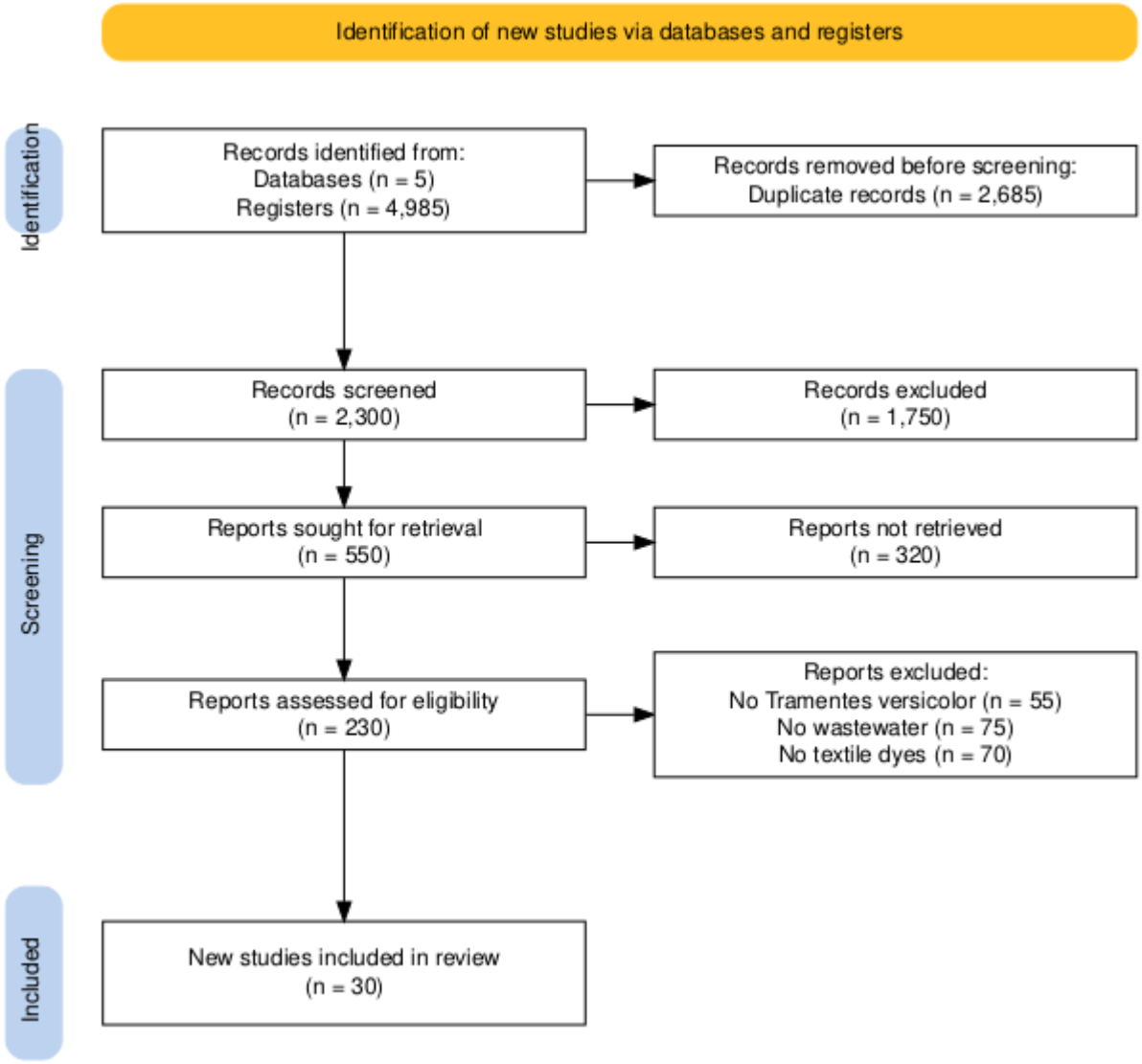


Figura 1. *Diagrama de flujo PRISMA.* Fuente: elaboración propia a partir de información de Haddaway, N. R., Page,

M. J., Pritchard, C. C., y McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis Campbell Systematic Reviews, 18, e1230. https://doi.org/10.1002/cl2.1230.

En la siguiente **tabla (2)** se presentan los artículos incluidos en la revisión sistemática, los cuales fueron seleccionados conforme a los criterios de inclusión definidos en la metodología. Cada estudio se describe en relación con el país en el cual se realizó la investigación, el tipo de colorante que se busca eliminar, los efectos observados, el porcentaje de remoción y el tipo de tratamiento que se utilizó (el microorganismo de estudio). Esta sistematización permite visualizar de manera comparativa los principales aportes de la literatura y es la base para el análisis posterior de los hallazgos.

Tabla 2. ***Características de los estudios y factores que afectan la actividad enzimática***

Autor (año)	País	Tipo de colorante	Efecto observado	% Remoción	Tipo de tratamiento
Fayyaz et al. (2025)	Pakistan	Directo y disperso (Direct pink B, yellow BG, disperse red S3B, disperse yellow SRLB)	Optimización RSM-CCD mejora biodegradación; MnP activa (óptimo pH 4, 30°C); mayor degradación colorantes directos vs. dispersos	93.29%(Direcr Pink B + fuentes C/N) 84.69%(Direct Yellow BG, RSM)	Biomasa fúngica (*T. versicolore)*
Fatima et al. (2025)	Pákistan	Disperso (Disperse Red-1, Disperse Blue-a, aguas residuales reales)	Adsorcion completa en <12 h; degradación colorantes directos vs dispersos	>80% (reportado en conclusiones)	Biomasa fúngica (*T. versicolore)*
Cordeiro et al. (2026)	Brasil	Reactivo (Reactive Blue 198)	Alg + ZnONPs@Lac retiene 153% actividad inicial a 35 dias; mayor estabilidad pH/T vs lacasa libre ; Cu2+ mejor agente entrecruante (eficiciencia 52%)	Hasta 86% (Alg + ZnONPs@Lac, condiciones optimizadas)	Enzimático (lacasa inmovilizada en alginato + ZnONPs)

Levin et al. (2019)	México / Argentina	Azo (RB5), Antraquinonico (RBBR), Trifenilmetano (Crystal Violet)	*Trametes sp*LA1: lacasa única enzima ligninolitica detectada; decolorización y detoxificación sin mediadores exógenos ; T. máxima LE130 genera metabolitos más tóxicos posttratamiento	79.7% Crystal vioket 54.4% RBBR (*Trametes sp* LA1, 24h, 200 ppm)	Enzimático / Biomasa(lacasa como enzima principal)
Nouaa et al. (2025)	Marruecos/Francia/ Rumania	Azul de metileno (MB), Cristal Violeta (CV)	Estabilidad térmica y reusabilidad mejorada (>70% tras 10 ciclos)	74% (MB) /69% (CV)	Biológico (Enzimático inmovilizado)
Durmus et al. (2026)	Turquía	Efluente cosmético	Remoción de carga orgánica y producción de metano	79.5% (Color) / 90.4% (DQO)	Biológico (Anaerobio)
Martínez-Trujillo et al. (2024)	México	Negro reactivo 5 (RB5)	La aireación modifica la producción de enzimas ligninolíticas	>98%	Biológico (Fúngico aeróbico)
Sánchez-Quitian et al. (2022)	Colombia	Azul de anilina y Rojo Congo	*T. villosa 0562* mostró una mayor capacidad de decoloración	± 90% (T. villosa)	Biológico (Cepas)
Yang et al. (2017)	Rep. De Corea	Ácidos, dispersores y reactivos como Rojo ácido 114	Amplio espectro de decoloración en colorantes azoicos y antraquinónicos	>90% (en la mayoría)	Biológico (Micorremediación)
Saha & Mukhopadhyay (2020)	India	Rojo Congo	El mediador acelera la tasa de reducción y decoloración	NR (Enfoque en cinética/voltamperometría)	Biológico (LMS)

Martínez-Castillo (2023)	México	Acid Red 27 (Azo)	Decoloración y degradación de metabolitos	100%	Biológico (Consorcio)
Patel et al. (2024)	Corea del Sur	Azul de Coomassie R250	Estabilidad catalítica mejorada (en reuso)	81.1%	Enzimático (Inmovilizado)
Plácido et al. (2016)	Colombia	Novacron Red/ Remazol	Degradación y detoxificación	>90%	Biológico (Fúngico)
Ramayanam (2025)	India	Efluente téxtil crudo	Degradación del enlace N=N	99%	Enzimático (Purificado)
Isik et al. (2026)	Turquía	Azo/disperso (MB, Congo Red, CBB G-250)	Mayor actividad de lacasa inmovilizada vs libre; remocion completa de Congo Red y CBB G-250 en 24 h	96% (CR, CBB); 95% MB	Enzimática (lacasa en aerogel Cu-sílice)
Kalnake et al. (2023)	India	Azo (Reactive Black)	Mayor degradacion por sinergia microbiana (cultivo mixto) COD 85% reducido en 25 días continuos	93% decolor; 85% COD	Consorcio fúngico (*P. chysosporium* + *T. versicolor* en GAC)
Zosenko et al. (2022)	Ucrania	Multiple: Azo(AR1, MO, MB13), índigo (IC), Antraquinona(RB 4), trifenilmetano (CV, MG) Tiazina (MB)	Aumento en eficiencia por mediador HIPD; 100% IC y AR1 en 3h; MB no decolorizado por LMS	100% IC, AR1; 90.8% MO; 0% MB	Híbrido (lacasa + mediador HIPD)
Uber et al. (2025)	Brasil	Congo Red (Azo), Malachite Green (Trifenilmetano), RBBR (Antraquinona)	Retiene robustez funcional bajo estrés salino (NaCl y Na2SO4); detoxificación marcada confirmada con semillas	95% (MG), 88% (RBBR), 75% (CR) tras 12 horas en presencia de 0.5 M de sales.	Enzimático (Lacasa de *Tramates versicolor*)

			de lechuga		
Wang et al. (2025)	China	Reactive Blue (RB19)	Uso de armazones metal – orgánicos (MOF) para encapsular lacasa	91,5% en 12 horas	Enzimático (Lacasa inmovilizada)
Bansal y Kanwar (2025)	India	Remazol Brillant Yellos 3-GL	Correlacion directa entre secreción de lacasa y remoción rápida	100% (en 48 horas)	Enzimático (Hongo lignolítico)
Amponsah et al. (2025)	Ghana	Colorantes textiles reales	Producción optimizada de Lacasa para tratamiento de aguas residuales industriales	89% - 94%	Bioproceso (Hongo ligninolítico)
Asgher et al. (2025)	Pakistán	Mezcla de colorantes azoicos	Inmovilización de enzimas para mejorar la estabilidad y reutilización en ciclos	92%	Enzimático (Lacasa inmovilizada)
Goyat et al. (2024)	India	Mezcla de colorantes textiles (Azul brillante, Rojo reactivo, etc)	La purificación por DEAE Sepharose aumentó la eficiencia 16.23 veces. La inmovilización en poliacrilamida permitió mantener la actividad a 35 °C y ph 5.0.	92% - 96% (dependiendo del colorante específico en la mezcla)	Enzimático (Lacasa purificada de *Trametes versicolor* HBB 7328 inmovilizada en gel de poliacrilamida)

Legerska et al. (2018)	Eslovaquia	Monoazoicos (Orange 2 y Acid Orange 6)	La degradación es más rápida cuando el grupo hidroxilo está en posición orto respecto al enlace azo. Reducción significativa de fitotoxicidad (41.2 - 64.4%)	72% (orange 2) y 45% (Acid Orange 6)	Enzimático (Lacasa Trametes versicolor)
Miyawaki & Sakai et al. (2025)	Japón	Azoicos (Direct Red 23, Acid blue 92, Trypan blue)	Las nanofibras de fibroína de seda ampliaron el rango de estabilidad de pH y temperatura, se realizó por 8 días	50% - 60% (en sistema de flujo continuo)	Enzimático (Lacasa inmovilizada)
Borham et al. (2025)	China / Egipto	Malachite Green (MG)	En el estudio se utiliza biomasa de alga roja como estabilizador terminco y esto detono una mejor estabilidad operativa de la lacasa	91.4%	Enzimático (Lacasa inmovilizada)
Zhang et al. (2025)	China	Congo Red (CD), Methyl Orange (MO)	Al utilizarse hidrogel de ciclodextrina redujo la resistencia a la difusion del sustrato gracias a su estructura porosa	90% - 95%	Enzimático (Lacasa inmovilizada)

Sar et al. (2024)	Suecia / Polonia	Efluentes industriales complejos	Destaca la capacidad de los hongos para recuperar recursos mientras limpian el agua	Variable (Alta eficiencia en mezclas)	Biológico (Hongos de pudricion blanca)
Zhang, H. et al. (2023)	China / USA	Azure B (junto a Sulfanilamidas)	Sinergia: el antibiótico induce la sobreexpresion de Lacasa y MnP, acelerando la degradación del colorante	86.5%	Fúngico (Trametes versicolor con sistema activado)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 2 demuestran que el género *Trametes,* y más específicamente *Trametes versicolor,* posee una variabilidad enzimática excelente para ser utilizada en el tratamiento de diversos tipos de colorantes sintéticos, desde estructuras complejas como lo son los azoles y antraquinonas hasta trifenilmetanos y efluentes reales complejos (Zosenko et al., 2022). Se observa una tendencia clara hacia la transición de sistemas de biomasa fúngica integral hacia sistemas enzimáticos purificados o inmovilizados, esto permite una mayor especificidad y control sobre las condiciones del proceso. Estos altos niveles de remoción, que en la mayoría de los estudios supera el 90%, corrobora que los sistemas ligninolíticos no solo decoloran, sino que intervienen en la ruptura de enlaces químicos fundamentales, como lo son el enlace –N=N– característicos de los colorantes azo. (Luo et al.,2026; Ceborati et al., 2025; Gong et al., 2025; Li et al., 2025)

Uno de los hallazgos más significativos es la superioridad técnica de los sistemas inmovilizados frente a las enzimas libres. Estudios como los de Cordeiro et al., 2026 y Patel et al., 2024; destacan que la inmovilización en soportes como alginato con nanopartículas de ZnO o hidrogeles de ciclodextrina mejora drásticamente la estabilidad térmica y operativa de la lacasa.

- **Estabilidad:** La lacasa inmovilizada puede retener hasta el 153% de su actividad inicial tras 35 días, superando las limitaciones de desnaturalización rápida de las enzimas libres (Zosenko et al., 2022).
- **Reusabilidad:** Sistemas inmovilizados en soportes como aerogeles de Cu-sílice o armazones metal-orgánicos (MOF) garantizan remociones superiores al 90% en tiempos que carían de 12 a 24 horas. Además, se reportan una recuperación del biocatalizador que mantiene eficiencias mayores al 70% tras 10 ciclos de uso (Patel et al., 2024; Placido et al., 2016)
- **Condiciones óptimas:** Mientras que sistemas basados en, Manganeso Peroxidasa (MnP) muestran una eficiencia máxima a Ph ÁCIDO (4.0) Y temperaturas moderadas (30 °C), la inmovilización permite que las enzimas operen en rangos de Ph y salinidad más amplios, incluso bajo éstres salino de 0.5 M (Bansal y Kanwar et al., 2025)

En los mecanismos bioquímicos se resalta la lacasa como la enzima ligninolítica principal, y en ocasiones única, detectada en cepas como *Trametes sp.* LA1 para la decoloración y detoxificación.

- **Sistemas de mediadores (LMS):** El uso de mediadores químicos como el HIPD acelera drásticamente las tasas de reducción, logrando una decoloración del 100% en colorantes como el Índigo o el Acid Red 1 en solo 3 horas. (Zosenko et al., 2022).

- **Manganeso Peroxidasa (MnP):** Su rol es fundamental en la degradación de colorantes directos y dispersos, mostrando una actividad óptima a Ph ácido (4.0) (Fayyaz et al., 2025).

- **Inducción química:** Se ha demostrado que la presencia de inductores como las sulfanilamidas potencia la eficiencia del hongp al promover la sobreexpresión de Lacasa y MnP (Zhang, H et al., 2023).

La transición de ensayos con colorantes individuales hacia mezclas de efluentes industriales complejos confirma la aplicabilidad tecina de estos sistemas. Estudios enfocados en efluentes crudos reportan remociones de color del 99% y reducciones de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de hasta el 90.4%. Es notable que el uso de consorcios fúngicos como por ejemplo *P.chrysosporium* + *T. versicolor* mejora la sinergia microbiana, logrando reducir la carga orgánica de forma continua durante periodos prolongados. Asimismo, la inmovilización en soportes magnéticos o hidrogeles de ciclodextrina facilita la implementación en reactores de flujo continuo, optimizando la afinidad entre la enzima y el sustrato. (Patel et al., 2024; Placido et al., 2016).

Tabla 3. *Tipos de colorantes y biodegradabilidad*

Tipo de colorante	Estructura química	Dificultad de degradación	Ejemplos	Observaciones
Azo	Caracterizados por la presencia de uno o más enlaces azo (-N=N-) asociados con anillos arómaticos (Zosenko et al., 2022; Fayyaz et al., 2025)	Muy alta. La estabilidad del enlace azo y la repulsión por grupos sulfónicos dificultan el ataque enzimático directo (Gugel et al., 2024)	Acid Red 1, Methyl Orange, Mordant Blue 13 (Zosenko et al., 2022), Congo Red (Saha y Mukhopadhyay, 2020), Reactive Black 5 (Kalnake et al., 2023)	La degradación suele requerir mediadores (LMS) como ABTS o HIPD para transferir electrones al núcleo arómatico y romper el enlace azo (Saha y Mukhopadhyay, 2020; Zosenko et al., 2022)
Antraquinona	Basados en el anillo de antraceno -9,10-diona. Estructura plana y rígida con sustituyentes amino o hidroxilo (Yang et al., 2017)	Atla/Moderada. Resistentes a la degradación química, pero vulnerables a la oxidación por lacasas debido a su alto potencial redox (Isik et al., 2026)	Remazol Brilliant Blue R (RBBR), Acid Blue 62, Alizarin Red S	La inmovilización en soportes como aerogeles de Cu-sílice o nanopartículas de ZnO mejora la estabilidad frente a la inhibición por sales (Isik et al., 2026; Cordeiro et al., 2026)
Reactivo	Contienen grupos reactivos (ej. Vinilsulfona o clorotriazina) que forman enlaces covalentes con la celulosa (Martínez - Trujillo et al.,	Alta. Su alta solubilidad y diseño para la persistencia los hace recalcitrantes en sistemas acuosos (Kalnake et al.,	Reactive Black 5, Reactive Blue 4, Remazol Black, Novacron Red, Turquoise Blue	El régimen de aireación es crítico; difusores de burbuja fina optimizan la producción de Peroxidasa Versátil

	2024)	2023)		(VP), acelerando la ruptura del cromóforo (Martínez - Trujillo et al., 2024)
Disperso	Moléculas de bajo peso molecular, no iónicas y altamente hidrofóbicas (Fayyaz et al., 2025)	Alta (por biodisponibilidad). Su baja solubilidad limita el contacto con las enzimas en fase líquida (Fatima et al., 2025)	Disperse Red 1, Disperse Blue 1, Disperse Blue 79, Disperse Orange 11	*T. versicolor* utiliza la Manganeso Perozidasa (MnP) como enzima clave para atacer estas estructuras en condiciones de limitación de nitrógeno (Fayyaz et al., 2025)
Trifenilmetano	Tres anillos aromáticos unidos a un carbono central (carbono sp2) (Zosenko et al., 2022)	Moderada. El centro de la molécula es susceptible a la oxidación, lo que causa la pérdida inmediata de colore (decoloración)	Malachite Green, Crystal Violet, Bromothymol Blue	Son degradados eficientemente por sistemas de lacasa libre e inmovilizada en zeolita NaY, logrando tasas superiores el 90% en pocas horas (Ameri et al., 2023)
Indigoide	Grupos indol unidos por un doble enlace	Moderada/Alta	Indigo Carmine (IC)	Los sistemas de inmovilización (natural/sintético) permiten operar en flujos continuos reduciendo el impacto de los subproductos oxidativos en la enzima.

Fuente: elaboración propia

Como hemos evidenciado en la anterior tabla, *Trametes versicolor* y sus sistemas enzimáticos ligninolíticos poseen una versatilidad excepcional para la biodegradación de diversas familias de colorantes sintéticos, logrando eficiencias qie generalmente superan el 90%. La capacidad de este hongo para mineralizar estructuras aromáticas complejas no es uniforme, sino que depende intrínsecamente de la naturaleza química del xenobiótico y de la configuración del sistema de tratamiento (biomasa fúngiva vs enzimas inmovilizadas) (Patel et al., 2024; Placido et al., 2016).

Uno de los hallazgos más críticos es la correlación entre la complejidad estructural del colorante y su susceptibilidad al ataque enzimático. Los colorantes de tipo Azo presentan la mayor dificultad de degradación debido a la estabilidad del enlace -N=N- y la repulsión ejercida por grupos sulfónicos, los cuales dificultan el contacto directo con el centro activo de las enzimas. Por otra parte, los colorantes de Trifenilmetano y de tipo Antraquinona muestran una susceptibilidad moderada a alta. En este caso del trifenilmetano, la oxidación del carbono central facilita una pérdida inmediata del color, mientras que las antraquinonas, aunque resistentes a la degradación química, son vulnerables a la oxidación por lacasas debido a su alto potencial REDOX.

Los resultados analizados confirman que la lacasa es la enzima predominante reportada en los procesos de decoloración por *Trametes versicolor*, especialmente en sistemas inmovilizados. No obstante, el papel de las peroxidasas es fundamental para abordar estructuras específicas. Por ejemplo, se observa que la Manganeso Peroxidasa (MnP) es clave para atacar colorantes dispersos en condiciones de limitación de nitrógeno, mientras que la optimización del régimen de aireación favorece la producción de Peroxidasa Versátil (VP), acelerando la ruptura del cromóforo en colorantes reactivos (Patel et al., 2024; Placido et al., 2016).

Un patrón recurrente en la literatura es la superioridad de los sistemas que emplean mediadores químicos (LMS por sus siglas en ingles). El uso de compuestos como ABTS o HIPD permite superar las barreras estéricas de los colorantes azoicos, actuando como “puentes” de electrones que facilitan la oxidación de sustrato con potenciales de oinización elevados. Esto se refleja en los estudios de Zozenko et al., 2022; donde la adición de mediadores permitió alcanzar una remoción del 100% en colorantes como Acid Red 1 e Indigo Carmine en tan solo 3 horas.

La transición de sistemas de biomasa libre a sistemas enzimáticos inmovilizados representa un avance significativo en la biotecnología de tratamiento de efluentes. Diversos autores destacan que la inmovilización en soportes como hidrogeles de ciclodextrina, nanofibras de seda o nanopartículas de ZnO no solo mejora la estabilidad térmica y frente al Ph, sino que permite la reutilización de la enzima en múltiples ciclos operativos (>70% tras 10 ciclos) (Nouaa et al., 2025).

Además, la inmovilización mitiga uno de los mayores desafíos en el sector textil: la inhibición por sales. Estudios demuestran que el uso de aerogeles de Ci-sílice permite mantener la actividad enzimática incluso en presencia de altas concentraciones de NaCl y NaSO4, condiciones típicas de los efluentes reales (Patel et al., 2024; Placido et al., 2016).

Desde una perspectiva aplicada, la eficiencia de *Trametes versicolor* no se limita a la remoción de color, sino que se extiende a la detoxificación del agua. La literatura reporta reducciones significativas en la carga orgánica (DQO) de hasta un 90.4% y una disminución marcada en la fitoxicidad de los metabolitos resultantes, confirmada mediante pruebas de germinación de semillas (Nouaa et al., 2025; Patel et al., 2024; Placido et al., 2016).

Sin embargo, se observa una viabiidad importante cuando se comparan mezclas de colorantes frente a colorantes aislados. Mientras que los sistemas inmovilizados logran tasas superiores al 90% en colorantes individuales en pocas horas, el tratamiento de mezclas industriales complejas requiere tiempos de retención mayores o el uso de consorcios fúngicos como por ejemplo *P.chrysosporium* + *T.versicolor* para garantizar una degradación sinérgica de los subproductos oxidativos. (Nouaa et al., 2025; Patel et al., 2024; Placido et al., 2016)

Tabla 4. *Comparación de eficiencia de tratamientos*

Tipo de Tratamiento	Rango de remoción (%)	Ventajas	Limitaciones	Aplicabillidad
Biorreactor de Discos Empacados Rotativos	100% decoloración; >93% (COD)	Alta eficiencia en la reducción de carga orgánica (COD), estabilidad en operación prolongada	Requiere de control de flujo y reciclaje de corriente para mantener eficacia	Muy alta
Biorreactor Anerobio de Flujo Ascendente con hongos inmovilizados en poliuretano	90.4% COD (*T. versicolor*); 84% COD (*P. ostreatus*)	La operación es estable y eficiente para aguas residuales cosméticas complejas	La remoción del Carbono Orgánico Total es inferir a la de COD	Alta
Enzimático Lacasa - Mediador (LMS) con oxima alifática	~100 decoloración en 3h (para Indigo Carmín, Acid Red 1, Methyl Orange y Reactive Blue 4)	Alta velocidad de degradación, alta detoxificación, se puede volver a reutilizar del sistema	Baja eficiencia en colorantes de trifenilmetano, nula remoción de Azul de Metileno	Media
Biomasa fúngica (*T. versicolor*) y enzimas MnP	58,9% (para Direct pink B), 54.4% (Direct yellow BG)	Identificación de la participación de la enzima Manganeso Peroxidasa durante el proceso	Eficiencia moderada en comparación a otros sistemas inmovilizados o de biorreactor	Media
Biomasa fúngica (Células libres *T. versicolor*)	>80% de eficiencia en aguas residuales textiles	Tiene un enfoque ecológico y reducción de toxicidad en tintes recalcitrantes	El crecimiento fúngico es lento por lo que se observa degradación en 3 días	Baja
Inmovilización en LDH/Alginato	Optimizado	Alta estabilidad térmica y de almacenamiento, es reutilizable y de fácil separación	Usa glutaraldehído como reticulante que puede afectar la actividad si no se optimiza	Alta
Inmovilización en NaY-Zeolita	Alta en catiónicos	Maneja un soporte poroso que mejora la carga enzimática	Alta complejidad en la síntesis del soporte de zeolita	Media
Sistema lacasa + ABTS	Proceso oxidativo de Congo Red	Capacidad para degradar colorantes azoicos altamente resistentes	El mediador ABTS puede ser costoso en aplicaciones a gran escala	Media
	98.8%			Alta

Consorcio microbiano (*T. versicolor* + *P. putida*)		Sinergía metabólica que mejora la cinética de degradación, alta sensibilidad	Alta complejidad en el mantenimiento del equilibrio poblacional entre bacteria y hongo	
Filtro Biocatalítico	100% (Diclofenaco)	Remoción efectiva de microcontaminantes y productos de ozonización	Se puede presentar posibles pérdidas de actividad enzimática por lixiviación	Alta
Híbrido (ZnO + Alginato) con lacasa inmovilizada	90% - 100% (Blue 198 - Remazol Red)	Las nanopartículas de ZnO actúan como cocatalizadores	Un costo alto de síntesis de nanoparticulas y además la complejidad de la preparación del soporte	Alta
Nanobiocatalizador Híbrido Magnético (Inorgánico + Proteína)	>95% (Colorantes sintéticos)	Alta resistencia a inhibidores químicos y iones metálicos	Requiere de equipos magnéticos para la separación a gran escala	Muy alta
Agregados Enzimáticos Reticulados de Lacasa	95% (Bisfenol A)	No requiere un soporte sólido externo, también mejora la estabilidad ante el pH en rangos 3-7 y en la temperatura	Por la densidad del agregado se limita potencial la trasferencia de masa	Alta
Tratamiento Enzimático con Lacasa	~92% (En efluentes de baños de tintes)	Usa sustratos económicos y es efectivo en condiciones de efluentes crudos	Se puede presentar variabilidad en la actividad enzimática dependiendo del lote	Media
Cultivo de suero lácteo	>90% (Colorantes Azo)	Utiliza el suero de leche como sustrato lo que reduce costos operativos	Control estricto de la carga orgánica del residuo lácteo	Media
Biomasa Fúngica (Pellets)	40%-100% en efluentes textil real	Eficiente en la decoloración de mezclas complejas, capacidad de operar en reactores de columnas	Se requiere suplementación externa de carbono, como por ejemplo, glucosa para el metabolismo	Media
Biomasa Fúngica (*T. versicolor CBR43*)	60.1% - 100% (Colorantes ácidos, dispersos y reactivos)	Versatilidad para degradar diferentes clases químicas de colorantes	Tiempos de retención largos (hasta 15 días para máxima eficiencia)	Media
Cepas Nativas Mexicanas (*Trametes sp.*)	80% - 100%	Detoxifican según ensayos realizados	Rendimientos variables según la cepa que se use	Media

	93%			Muy alta

Inmovilización en Aerogel de Cu-Silice		Maneja un gran área superficial de 370m2/g, también tiene una alta estabilidad térmica de hasta 60°C	Alta complejidad en la síntesis del soporte de aerogel y usa glutaraldehído como reticulante (que es potencialmente tóxico)	
Biorreactor de Inmovilización en Espuma	>98% (Reactive Black 5)	La aireación optimiza la producción de una enzima, Peroxidasa Versátil. Además se ve una remoción en 144h	Depende del tipo de difusor de aire para maximizar la actividad enzimática	Alta
Tratamiento Enzimático con Lacasa de *T. versicolor* bajo estrés salino	~90 (Dye RBBR)	Tiene una alta tolerancia de salinidad, se reporta hasta 0.5 M de NaCl, además es efectivo para detoxificación	En concentraciones extremas de sal como >0.5 M se reduce la eficacia	Media
Cepas Nativas Colombianas (*Leptosphaerulina sp*.)	>90% (Novacron Red y Remazol Black)	En efluentes industriales tienen un excelente desempeño. Tienen capacidad para detoxificar	El hongo requiere condiciones específicas de agitación para mantener su viabilidad	Alta
Basidiomicetos Andinos en Colombia	Variable	Se identificaron cepas que secretan lacasas y celulosas en altas montañas, además se encontró que tiene adaptibilidad climática	Se enfoca en la caracterización, por lo que se necesita llevarlo a escalas industriales	Media
Enzimático Lacasa inmovilizada en fibras de seda - reactor de membrana continuo	60-86% (batch), 42% de actividad residual (tras 8 días de operación continua)	Bajo impacto ambiental por el uso de seda, subproducto de sericultura), más estable el Ph y tenperatura que el uso de la enzima libre, resistencia moderada a la liofilización y ciclos de congeladescongelación	La decolorización no alcanza el 100%, toxicidad de productos de degradación. Además usa mediadores ABTS que no se midió el impacto ambiental	Alta
Enzimático híbrido: Lacasa inmovilizada en ZIF-8 (MOF) + atrapamiento en hidrogel de alginato reticulado	94.8% (índigo carmín) y 90.7% (verde ácido)	Mejor estabilidad térmica y de pH que la enzima libre, ZIF-8 adsorbe activamente los colorantes aumentado concentración local de sustrato cerca de la enzima	El glutaraldehído es tóxico para organismos acuáticos, por lo que requiere neutralización, la decolorización decre tras ciclos sucesivos	Alta
Lacasa inmovilizada sobre nanopartículas	81.9% antraceno (sin mediador),	Mayor actividad que la lacasa libre en rango de temperatura 30°-70°C,	Para solubilizar los contaminantes se uso como surfactante y esto	Media

magnéticas Fe3O4 - batch	96.8- 99.1% (con mediadores ABTS)	reduce costos en comparación al uso de la lacasa libre en 3 ciclos catalíticos	puede interferir en otros procesos	
	93-5% - 100%			Muy alta

Biomasa de *T. versicolor IBL-04*		Tiene una alta eficiencia en tiempos cortos se demostró que en 2 días bajo condiciones óptimas, secreta coordinadamente el sistema lacasa - MnP	Tiene una sensibilidad extrema añ pH (fuera del rango 4-4.5) y a la temperatura, requiere de suplementos de carbono y mediadores ABTS para alcanzar el 100%	
Lacasa libre de *T. versicolor*	72.8% Orange 2 tras 120, 45.3% Acid Orange 6 tras 120h	Es un proceso de un solo paso, puesto que la decoloración y detoxificación se hacen simultáneamente sin reactivos adicionales, reduce la toxicidad hacía los microorganismos, reduce la fitotoxicidad lo que es potencialmente útil pata contextos agrícolas	Su eficiencia de decoloración fue baja, además que requiere tiempos prolongados, el pH es de 3.0 (muy ácido), por lo que en el contexto de efluentes téxtiles reales puede ser poco representativo porque suelen ser más alcalinos o neutros	Media
Híbrido (Cepa WH21 + Antibiótico SCT)	86.5% Azure B, SCT 96.2%	SCT, el antibiótico, actúa como inductor del sistema enzimático, se hace una remoción simultánea de colorantes y fármacos	Sí no se usa un inductor, el colorante por sí solo es díficil de degradar, se registró un 30.5% sin el inductor, además requiere de presencia de H2O2 y ácidos orgánicos para activar MnP	Alta
Lacasa inmovilizada en hidrogel de beta-ciclodextrina y ácido poliacrílico	95.2-100% Azul de Metileno	En comparación de la enzima libre, tiene una alta estabiliad térmica y química, puede reusarse varias veces	Se satura gradualmente en los sitios de adsorción tras el uso continuo	Muy alta
Biomasa fúngica inmovilizada	93-98.8% Eriocromo Negro T	Es económico, renovable y novedoso, con una alta estabilidad térmica (a 80°C se conserva el 31% de la actividad), una alta eficiencia por la acción	Se pierde gradualmente la actividad tras 6 ciclos de uso, también se ve una reducción en la afinidad enzima-sustrato	Muy alta

		simultánea de adsorción y degradación		
Biocatalítico (Lacasa/TEMPO/O_2)	100%	Demostró una alta eficiencia en efluentes simulados, es un sistema reusable por 73 ciclos manteniendo el >40% de actividad	Se pierde gradualmente la velocidad por ciclo, el mediador puede inactivar las enzimas	Muy alta
Híbrido (Alginato + ZnO-NPs + Lacasa)	86%	Alta resistencia térmica y tolerancia a pH alcalinos	Las nanopartículas reducen el tamaño de los poros, dificultando la difusión inicial del sustrato	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

Los sistemas de tratamiento muestran una evolución clara yendo desde sistemas biológicos a enzimáticos, cada vez más sofisticados, lo que refleja una búsqueda constante a una mayor eficiencia, rentabilidad para la degradación de colorantes textiles en comparación de tratamientos convencionales que no logran la misma efectividad ni degradación completa del mismo. A través de las ventajas reportadas se pueden evidenciar tres variables que fortalecen el uso de los diversos sistemas, las cuales son: la eficiencia de la remoción, la versatilidad frente a colorantes y la estabilidad de los sistemas. Diversos sistemas fueron capaces de alcanzar remociones superiores a 95% e incluso 100%, estos resultados no fueron exclusivos de un solo tipo de tratamiento, se demostró que sistemas como el Biorreactor de Discos Empacados Rotativos, el sistema biocatalítico Lacasa/TEMPO/O_2, Lacasa inmovilizada en hidrogel de beta-ciclodextrina y ácido poliacrílico mostraron porcentajes de remoción de 100% en decoloración, eficiencia en efluentes simulados y remociones variables entre el 95.2-100% de Azul de Metileno, siendo sistemas diferentes y no pertenecientes de una misma categoría demuestra que la eficiencia máxima no se centra únicamente en un sistema en particular o es exclusiva de alguno, sino que tanto en biorreactores como en sistemas enzimáticos inmovilizados o en biomasa en condiciones óptimas. Sin embargo, una comparación directa entre todos puede ser problemática debido a múltiples factores como los rangos de remoción, que varían de acuerdo al colorante objetivo, las condiciones fisicoquímicas como el pH, la temperatura o la presencia de mediadores, también las eficiencias elevadas de algunos estudios se alcanzaron mediante condiciones controladas de colorantes y de experimento, por lo cual, las aplicabilidades en contextos reales pueden ser complejo debido a que comienza a existir una brecha entre las condiciones propiciadas en laboratorios y los efluentes industriales reales con composiciones que incluyen mezclas de colorantes, detergentes, cargas orgánicas fluctuantes, lo que implica una de las mayores limitaciones a la hora de evaluar la literatura existente sobre la biodegradación de colorantes. Otra de las variables que se evidencian en este estudio es la versatilidad frente a los colorantes donde se puede observar notablemente el uso de *T. versicolor* con una ventaja frente a otros microorganismos, en estudios donde se utiliza la biomasa de *T. versicolor CBR43* que reporta degradar colorantes ácidos, reactivos y dispersos de manera simultánea o el consorcio microbiano *T. versicolor* + *P. putida* que reportó que la sinergia metabólica entre el hongo y la bacteria mejora la cinética de degradación con remociones de 95.8%, lo que posiciona a *T. versicolor* como un microorganismo versátil y con ventaja competitiva frente a tratamientos físico químicos usados de manera convencional, que suelen ser mucho más específicos para un único tipo de contaminante. La estabilidad de los sistemas representa otra fortaleza del uso de los diversos sistemas, especialmente en sistemas enzimáticos inmovilizados, destacando estudios que usan estos mismo donde: la biomasa fúngica inmovilizada cuenta con una estabilidad térmica que conserva el 31% de la actividad incluso a 80°C o el sistema biocatalítico Lacasa/TEMPO/O_2 que puede ser reusable hasta por 73 ciclos manteniendo más del 40% de su actividad, siendo de los principales estudios que promueven el uso de estos sistemas y su estabilidad operativa, que es

relevante en la práctica de contextos industriales con condiciones que no son constantes y el sistema debe de mantener su funcionalidad con variaciones de salinidad, pH, temperatura.

No obstante, a pesar de las ventajas, también se presentan limitaciones que condicionan la practicabilidad de los sistemas, tal como se mencionó anteriormente, en escenarios industriales reales. Como, por ejemplo, en los procesos de inmovilización como Inmovilización en LDH/Alginato, Inmovilización en Aerogel de Cu-Siloe y la Lacasa en ZIF-8MOF se usa glutaraldehído, un agente reticulante, que es tóxico para cuerpos acuáticos generando una contradicción donde un sistema utilizado para reducir la toxicidad de los efluentes genera nuevos contaminantes sí el agente reticulante no se neutraliza adecuadamente, pero no solo el glutaraldehído puede generar esta toxicidad, aunque algunos estudios de los reportados mencionan detoxificación de efluentes, la mayoría no incluyen una evaluación de toxicidad de metabolitos intermedios , por ejemplo, los colorantes azoicos pueden generar aminas aromáticas que son potencialmente cancerígenas durante la degradación oxidativa. Razón por la cual esta limitación en contextos donde se evalúa la sostenibilidad ambiental de los tratamientos puede ser crítica. Otra limitación destacable es la pérdida progresiva de la actividad enzimática tras varios ciclos de uso, como en el sistema Lacasa inmovilizada en hidrogel de beta-ciclodextrina se satura en sus sitios de absorción tras un uso continuo o el sistema biocatalítico Lacasa/TEMPO/O_2 que experimenta una disminución gradual de su velocidad por ciclo, también en el sistema de biomasa fúngica inmovilizada pierde su actividad enzimática tras 6 ciclos de uso con la reducción en la afinidad enzima-sustrato, esto nos puede indicar que a escala industrial esta degradación puede ser más progresiva. También, la especificidad frente al tipo de colorante puede ser otra limitación, debido a que la selección del sistema a usar no puede ser al azar o genérico, sino que debe determinarse por las características químicas presentes en los efluentes, como, por ejemplo, el sistema Enzimático Lacasa -Mediador (LMS) con oxima alifática que, aunque demuestra decoloraciones cercanas al 100% en colorantes azoicos e indigoides, es totalmente ineficaz con Azul de Metileno, registrando una remoción nula o sistemas como Biomasa fúngica (*T. versicolor*) y enzimas MnP que no tiene eficiencias de remoción altas, alcanzando únicamente entre un 54.4% a 58.9% sobre los colorantes.

Además, existen limitaciones asociadas al mantenimiento del hongo vivo que pueden condicionar los sistemas clasificados como biológicos, por ejemplo, para uso de la cepa CBR143, máxima eficiencia se demuestra hasta 15 días que limita la demanda industrial donde los procesos o tiempos de tratamientos sean cortos, o el uso de consorcios microbianos pueden presentar un alto mantenimiento y complejidad para el equilibrio poblacional entre la bacteria y el hongo.

Conforme a lo mencionado anteriormente, la alta demanda industrial puede generar limitación, pero a través de la aplicabilidad, la tabla permite identificar los sistemas que pueden ser más viables a la hora de tomar decisiones en contextos reales. En la clasificación de sistemas ‘muy alta’ todos comparten características similares: altas tasas de remoción, capacidad de operar en condiciones variables y estabilidad tras varios usos, en esta categoría destacan: Biorreactor de Discos Empacados Rotativos, Nanobiocatalizador Híbrido Magnético (Inorgánico + Proteína), Inmovilización en Aerogel de Cu-Silice, Biomasa de *T. versicolor IBL-04,* Lacasa inmovilizada en hidrogel de betaciclodextrina y ácido poliacrílico, Biomasa fúngica inmovilizada, Biocatalítico (Lacasa/TEMPO/O_2), Híbrido (Alginato + ZnO-NPs + Lacasa), se puede demostrar que esta categoría no está determinada por un solo factor, más bien, por la combinación entre eficiencia, reutilización y estabilidad operativa. En contraste que en la categoría ‘media’ reúne a todos los sistemas con mayores dificultades operativas como el uso de Lacasa libre que requieren pH de 3.0, que en la praxis puede variar debido a que en efluentes industriales reales son más alcalinos – neutros o los sistemas con mediadores ABTS que tiene un alto costo por el uso del mismo. A mayor sofisticación en el diseño del soporte de inmovilización o del reactor, mayor es la aplicabilidad que se reporta en la tabla, pero correlación implica una mayor complejidad e incluso, económicamente valores más costosos, por lo que, la eficiencia técnica no puede ser el único criterio para la selección de sistemas, en un contexto real, la aplicabilidad se puede definir como la capacidad de operar en

condiciones variables, de ser escalada a proporciones más grandes sin perder su desempeño y ser económicamente viable en el sector industrial.

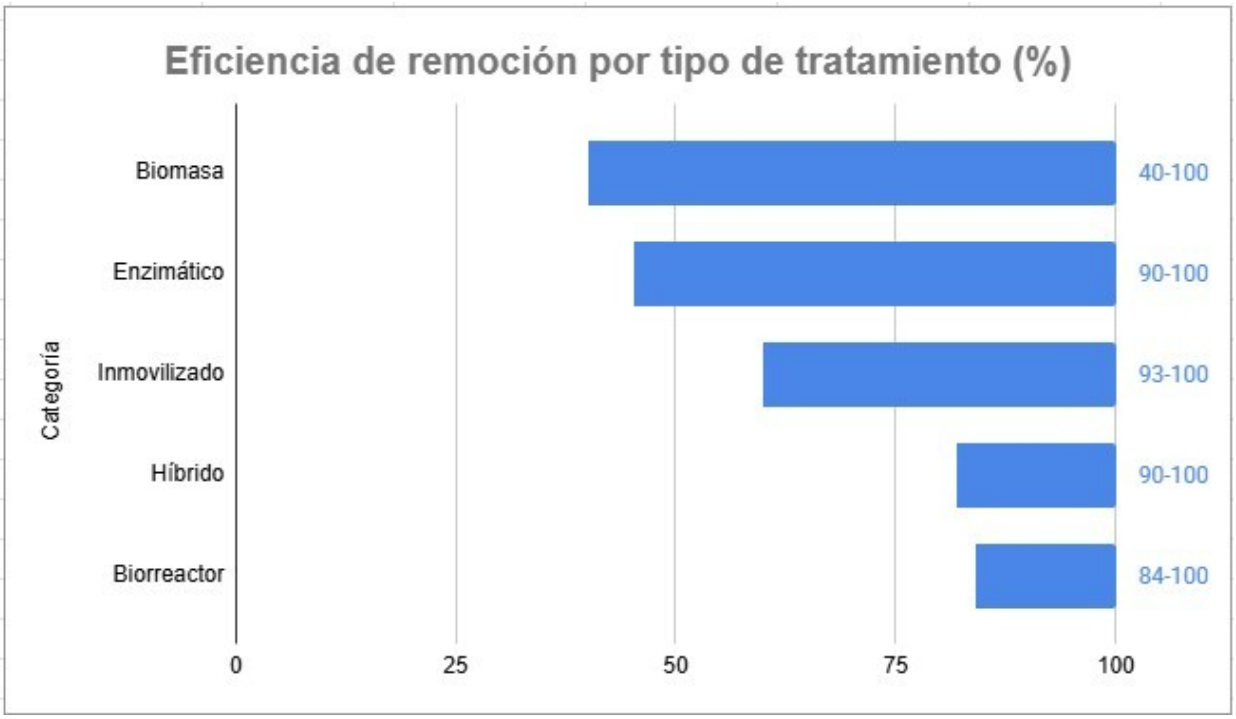


Figura 2. *Eficiencia de remoción por tipo de tratamiento*
Fuente: Elaboración propia

La comparación de los rangos de eficiencia entre los sistemas de tratamiento revela una relación inversa entre la amplitud del rango y la complejidad de la técnica de los sistemas, los biorreactores y sistemas híbridos presentan rangos de variabilidad más reducidos, de 16% y 18.1% respectivamente, con eficiencias mínimas desde 84% y 81.9% evidenciando una mayor estabilidad operativa debido a que controlan el mayor número de variables durante el proceso. Mientras que, el rango amplio de biomasa demuestra que al ser sistemas biológicos dependen que no siempre se pueden se tiene la posibilidadde controlar factores o variables como el estado fisiológico del micelio, disponibilidad de fuentes de carbono. Los sistemas enzimáticos tienen una dispersión intermedia (54.7) esto se debe a los sistemas tan distintos como la lacasa libre o el sistema biocatalítico Lacasa/TEMPO/O_2 quedan agrupados bajo una misma categoría provocando una amplitud o distorsión entre la comparación del rango.

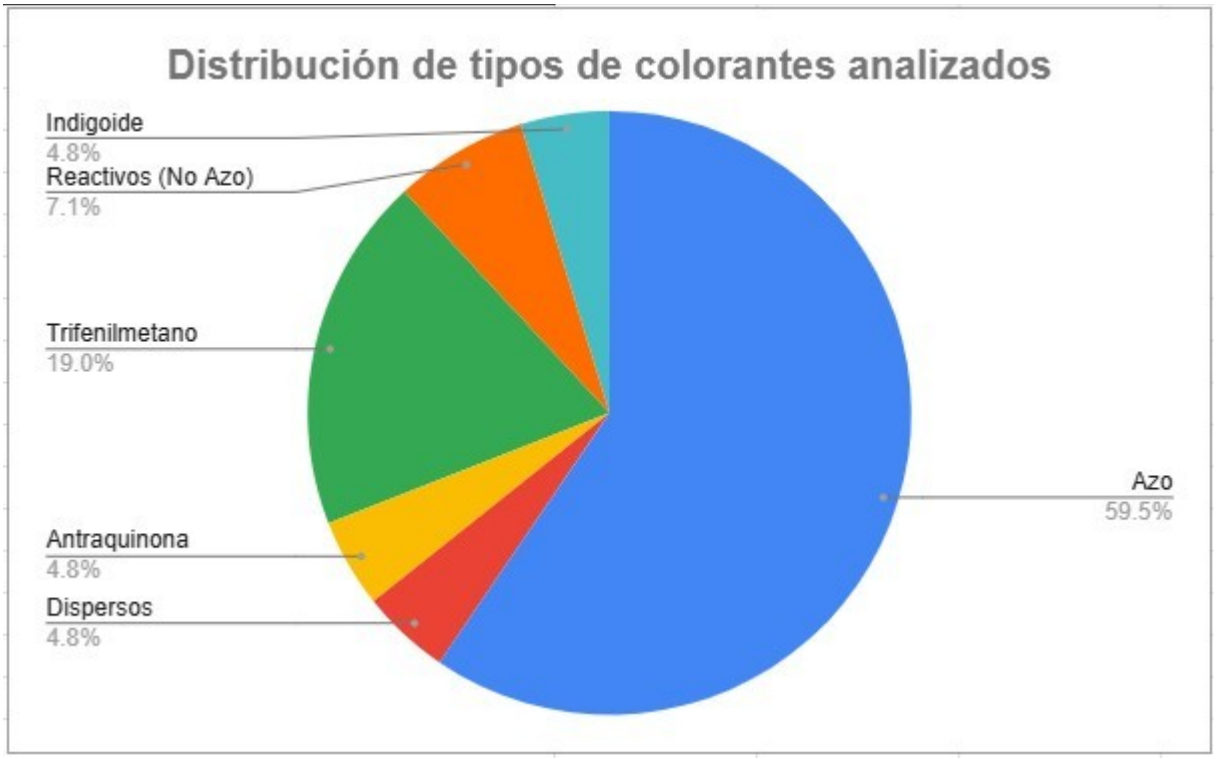


Figura 3. *Distribución de tipos de colorantes analizados*
Fuente: Elaboración propia

Los colorantes azoicos representan el 59.5% de los estudios analizados, de hecho, estos colorantes están presentes entre el 60% y 70% del volumen de los colorantes sintetizados en el mundo. También es conocido por su recalcitrancia, un grupo -N=N- que es resistente a la degradación por procesos convencionales de tratamiento aerobio, por lo que, los convierten en un blanco de estudio en sistemas enzimáticos fúngicos (López et al., 2023) Tras de él, están los colorantes trifenilmetanos que conforman el 19%, como por ejemplo, los más utilizados son el Azul de Metileno y el Verde de Malaquita, que son contaminantes recalcitrantes ampliamente utilizados en escala de laboratorio (Singh et al.,2025). Seguido, las clases de antraquinonas, dispersos, reactivos e indigoides representan un 21.5% restante, por lo que su conocimiento sobre la degradación enzimática de estos puede ser menor en comparación de los demás, por lo que, son colorantes con un área de investigación para profundizar.

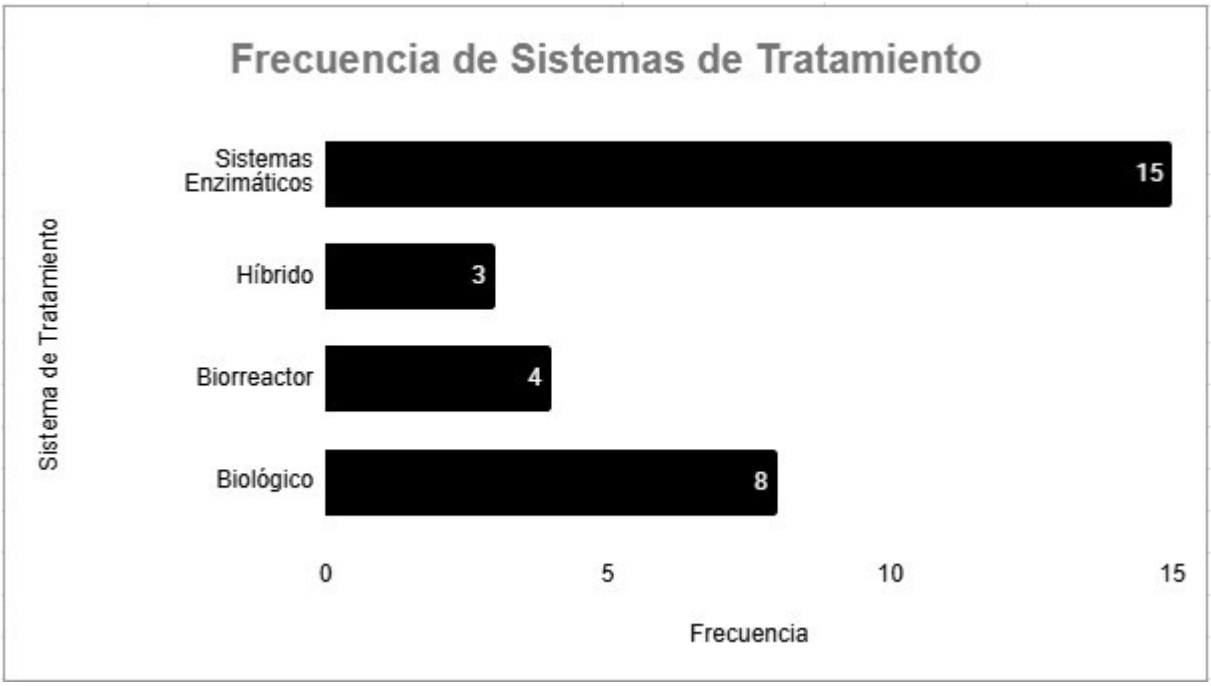


Figura 4. *Frecuencia de Sistemas de Tratamiento*
Fuente: Elaboración propia

En la literatura reciente, domina los sistemas enzimáticos con un 50% del total, es decir que 15 de 30 artículos se centran en estudiar estos sistemas donde sigue la línea investigativa de purificación, caracterización e inmovilización de enzimas, en especial la lacasa, como agente catalizador para optimizar su actividad en condiciones controladas. Los sistemas biológicos ocupan el segundo lugar con 8 estudios, demostrando que, el enfoque con organismos se mantiene vigente, pues se puede favorecer la versatilidad metabólica de estos frente a una sola enzima. Por último, los biorreactores y los sistemas híbridos, que ocupan los porcentajes menos frecuentes debido a que requieren mayores financiaciones e inversiones económicas para el desarrollo de estos sistemas.

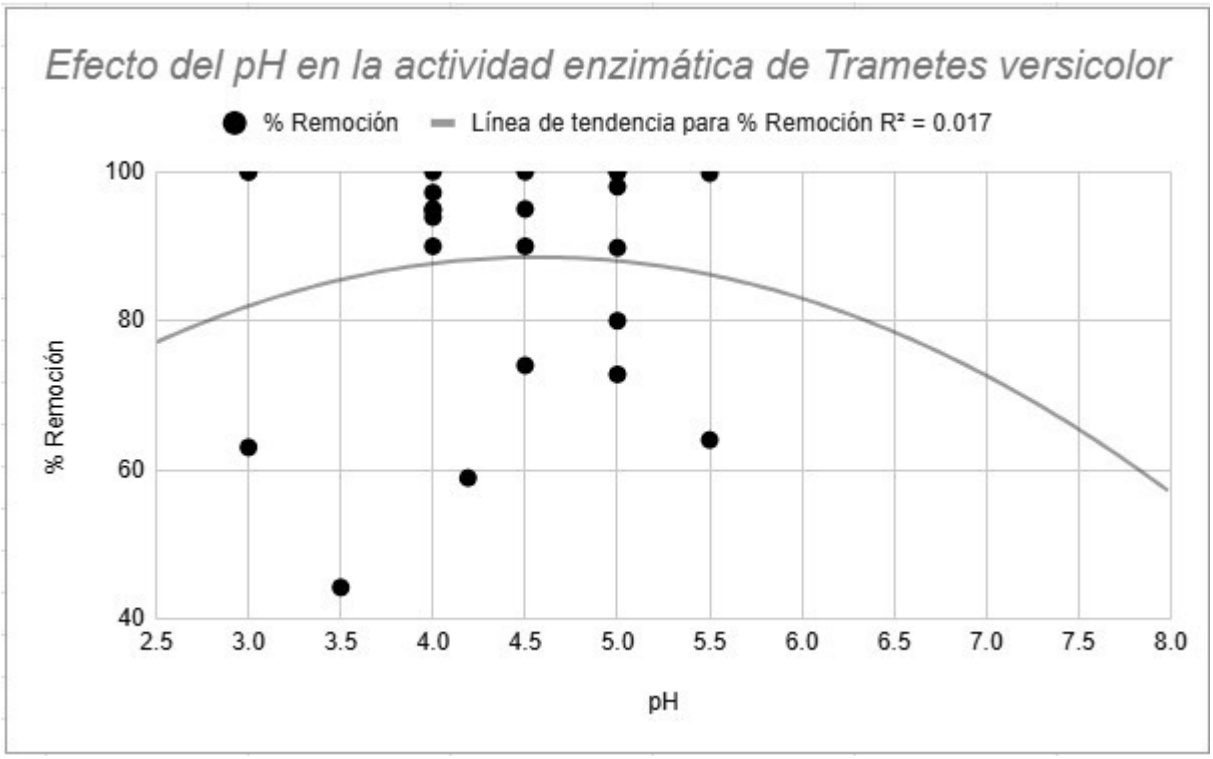


Figura 5. *Efecto del pH en la actividad enzimática de Trametes versicolor*
Fuente: Elaboración propia

Con la tendencia polinómica ajustada se presenta un coeficiente de determinación bajo (R2= 0.017), esto indica que el pH por sí solo y estadísticamente hablando, no es un predictor significativo para la eficiencia de remoción. Por lo que, no se representa un comportamiento aleatorio, más bien, la dispersión de los datos refleja la simultaneadad de múltiples variables que condicionan la eficiencia del sistema. La mayoría de los datos se concentra en el rango de pH 3.0-4.5 pero los sistemas presentes en esos datos tienen eficiencias muy diferentes, yendo desde el 44% hasta el 100%, lo que sugiera que existen otras variables con un papel más predominante, como, por ejemplo, el uso de mediadores, el método de inmovilización, la concentración del colorante. Sin embargo, el gráfico permite confirmar la actividad de la lacasa fúngica en condiciones de pH 3.0-5.5 donde se muestran eficiencias de más del 90% pero en pH superiores se asocia a eficiencias menores o sistemas especificamente diseñados para tolerar condiciones menos ácidas.

4. CONCLUSIONES

Para concluir, *Trametes versicolor* posee un alto potencial biotecnológico para la biodegradación de colorantes sintéticos en efluentes del sector textil. Se puede demostrar de manera consistente como el sistema ligninolítico de este hongo es capaz de mineralizar estructuras aromáticas complejas características de colorantes azoicos, antraquinónicos, reactivos, dispersos, trifenilmetanos e indigoides. Esto gracias a su alta capacidad enzimática, estando compuesto principalmente por lacasas, manganeso peroxidasas (MnP) y lignina peroxidasa (LiP). La eficiencia de estos procesos se ha evidenciado que va en la mayoría de los casos desde el 80% hasta alcanzar 100% de remoción. Este desempeño posiciona a *Trametes versicolor* como una alternativa viable para los procesos de biorremediación de aguas residuales industriales contaminadas con estos compuestos recalcitrantes.

Un hallazgo que se puede evidenciar en la revisión es la superioridad técnica de los sistemas enzimáticos inmovilizados frente a la biomasa fúngica libre o las enzimas en estado libre. La inmovilización de lacasa en soportes como hidrogeles de ciclodextrina, aerogeles de Cu-sílice, armazones metal-orgánicos (MOF) y alginato con nanopartículas de ZnO mejora significativamente la estabilidad térmica, la tolerancia a variaciones en el Ph y salinidad. Así mismo, el uso de sistemas lacasa-mediador (LMS) con compuestos como ABTS o HIPD permite superar las barreras estéricas de los colorantes más recalcitrantes. Estos avances representan una evolución progresiva desde enfoques microbiológicos clásicos hacia plataformas enzimáticas sofisticadas con mayor aplicabilidad en procesos industriales de tratamiento de efluentes.

Sin embargo, persisten carencias importantes en la evaluación de toxicidad de los metabolitos intermedios generados durante la degradación oxidativa, especialmente con los colorantes azoicos ya que pueden producir aminas aromáticas potencialmente cancerígenas. Finalmente, la escasez de estudios colombianos con cepas nativas limita la compresión del potencial de *Trametes versicolor* en las condiciones específicas del contexto específicamente colombiano.

A partir de los hallazgos de esta revisión, pueden dar origen a varias líneas de investigación prioritarias. Se recomienda desarrollar estudios que evalúen el desempeño de los sistemas inmovilizados de mayor aplicabilidad en condiciones de efluentes industriales reales y a escala piloto. Para finalizar, se invita a la comunidad científica colombiana a avanzar en la caracterización y aplicación de cepas nativas ligninolíticas con miras a su integración en los sistemas de tratamientos de aguas residuales del sector textil nacional.

4. DECLARACIÓN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de Inteligencia Artificial (IA) en la creación del artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amponsah, O., & Labus, K. (2025). Advancing enzyme immobilization for wastewater remediation: Laccase-MOF-hydrogel biocatalyst system for sustainable dye decolorization. *Biochemical Engineering Journal*, 110055. https://doi.org/10.1016/j.bej.2025.110055

Asgher, M., Shah, S. A. H., & Iqbal, H. M. N. (2016). Statistical Correlation between Ligninolytic Enzymes Secretion and Remazol Brilliant Yellow-3GL Dye Degradation Potential of Trametes versicolor IBL-04 . *Water Environment Research*, *88*(4), 338–345. https://doi.org/10.2175/106143016x14504669768011

Borham, A., Bkhit, M., Wang, J., & Qian, X. (2025). Immobilization of fungal laccase onto red seaweed biomass as a novel support for efficient dye decolorization. *Environmental Technology and Innovation*, *38*. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104143

Cordeiro, S. G., Weber, A. C., Schwingel Henn, G., dos Santos, J. S. H., da Rocha, A. L., Schmitz, C., Ferro, E. P., Kuhn, D., Corbellini, V. A., Konrad, O., Ethur, E. M., & Hoehne, L. (2026). Development and Application of a Hybrid Support of Laccase from Trametes versicolor with Zinc Oxide Nanoparticles for Textile Dye Degradation. *ACS Omega*, *11*(5), 7649–7658. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c08988

Deng, J., Wang, H., Zhan, H., Wu, C., Huang, Y., Yang, B., Mosa, A., & Ling, W. (2022). Catalyzed degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by recoverable magnetic chitosan immobilized laccase from Trametes versicolor. *Chemosphere*, *301*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134753

Durmuş, B., Nacar Koçer, N., & şenel, G. U. (2026). Anaerobic treatment of real cosmetic wastewater in a lab-scale UASB using fungal biocatalysts: COD/TOC removal and methane yield (Pleurotus ostreatus vs Trametes versicolor). *Process Biochemistry*, *163*, 58–65. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2026.02.007

Fatima, N., Nasir, A., Zahid, M., & Akram, M. (2025). Bioremediation of Textile Disperse Dyes using White-Rot Fungi Trametes versicolor. *International Journal of Innovations in Science and Technology*, 1253–1268. https://doi.org/10.33411/ijist/20257212531268

Fayyaz, I., Saddick, S., Mahmood, R. T., Asad, M. J., Hussain, M. A., Hu, J., Awais, M., Khan, M. I., & Saydaxmetova, S. (2025). Biodegradation of Azo and disperse dyes by Trametes versicolor: Process optimization and MnP enzyme dynamics. *Results in Engineering*, *25*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103980

Goyat, N., Kapoor, R. K., Saharan, B. S., Kapoor, P., Kumari, K., & Singh, N. (2024). Production, Purification and Immobilization of Laccase from Trametes versicolor HBB 7328 for its Role in Decolorization of Textile Dyes. *Indian Journal of Microbiology*, *64*(4), 1870–1883. https://doi.org/10.1007/s12088-024-01260-3

Hordieieva, I. O., Kushch, O. v., Hordieieva, T. O., Sirobaba, S. I., Kompanets, M. O., Anishchenko, V. M., & Shendrik, A. N. (2023). Eco-friendly TEMPO/laccase/O2 biocatalytic system for degradation of Indigo Carmine: operative conditions and laccase inactivation. *RSC Advances*, *13*(30), 20737–20747. https://doi.org/10.1039/d3ra03107a

Isik, S., Yucel, S., & Yuzugullu Karakus, Y. (2026). Immobilization of Trametes versicolor Laccase Enzyme to Cu-silica Aerogel and its Decolorization of Synthetic Dyes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. https://doi.org/10.1007/s12010-026-05633-w

Kalnake, R. P., Raval, R., Murthy, D. V. R., Vanzara, P. B., & Raval, K. (2023). Enhanced degradation of azo dye using mixed cultures of white-rot fungi in a modified rotating packed disc bioreactor and reuse of treated water. *Bioresource Technology Reports*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101449

Legerská, B., Chmelová, D., & Ondrejovič, M. (2018). Decolourization and detoxification of monoazo dyes by laccase from the white-rot fungus Trametes versicolor. *Journal of Biotechnology*, *285*, 84–90. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.08.011

Levin, L. N., Hernández-Luna, C. E., Niño-Medina, G., García-Rodríguez, J. P., López-Sadin, I., Méndez-Zamora, G., & Gutiérrez-Soto, G. (2019). Decolorization and detoxification of synthetic dyes by mexican strains of trametes sp. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(23). https://doi.org/10.3390/ijerph16234610

Martínez-Castillo, L. A., González-Ramírez, C. A., Cortazar-Martínez, A., González-Reyes, J. R., Otazo-Sánchez, E. M., Villagómez-Ibarra, J. R., Velázquez-Jiménez, R., Vázquez-Cuevas, G. M., Madariaga-Navarrete, A., Acevedo-Sandoval, O. A., & Romo-Gómez, C. (2023). Mathematical modeling for operative improvement of the decoloration of Acid Red 27 by a novel microbial consortium of Trametes versicolor and Pseudomonas putida: A multivariate sensitivity analysis. *Heliyon*, *9*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21793

Martínez-Trujillo, M. A., Domínguez-Morales, D. M., & García-Rivero, M. (2024). Aeration regime modifies ligninolytic enzyme production and biodegradation of reactive black 5 by immobilized Trametes versicolor. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(15), 9341–9352. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05502-1

Miyawaki, A., & Sakai, S. (2025). Degradation of azo dyes using laccase immobilized on mechanically ground silk fibroin nanofibers. *Bioresource Technology*, *438*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133251

Nouaa, S., Aziam, R., Carja, G., Chiban, M., & Froidevaux, R. (2025). Immobilization of Trametes versicolor laccase on LDH/alginate composite beads for improved textile dyes decolorization. *International Journal of Biological Macromolecules*, *303*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140577

Patel, S. K. S., Gupta, R. K., Karuppanan, K. K., Padhi, D. K., Ranganathan, S., Paramanantham, P., & Lee, J. K. (2024). Trametes versicolor Laccase-Based Magnetic Inorganic-Protein Hybrid Nanobiocatalyst for Efficient Decolorization of Dyes in the Presence of Inhibitors. *Materials*, *17*(8). https://doi.org/10.3390/ma17081790

Plácido, J., Chanagá, X., Ortiz-Monsalve, S., Yepes, M., & Mora, A. (2016). Degradation and detoxification of synthetic dyes and textile industry effluents by newly isolated Leptosphaerulina sp. from Colombia. *Bioresources and Bioprocessing*, *3*(1). https://doi.org/10.1186/s40643-016-0084-x

Ramayanam, B. M. (2025). Laccase enzyme production from Trametes versicolor : a sustainable approach to treat raw dye bath textile effluent . *Essential Chem*, *2*(1). https://doi.org/10.1080/28378083.2025.2527045

Saha, R., & Mukhopadhyay, M. (2020). Elucidation of the decolorization of Congo Red by Trametes versicolor laccase in presence of ABTS through cyclic voltammetry. *Enzyme and Microbial Technology*, *135*. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2019.109507

Sánchez-Quitian, Z. A., Quitian-Romero, J. C., Moreno-Buitrago, A. T., Montoya Barreto, S., Sanjuan, T., & Ortiz-Rosas, J. P. (2022). Isolation and characterization of wood-decomposing basidiomycetes from the Andean Forest in Boyacá, Colombia. *Brazilian Journal of Microbiology*. https://doi.org/10.1007/s42770-022-00760-y

Sar, T., Marchlewicz, A., Harirchi, S., Mantzouridou, F. T., Hosoglu, M. I., Akbas, M. Y., Hellwig, C., & Taherzadeh, M. J. (2024). Resource recovery and treatment of wastewaters using filamentous fungi. *Science of the Total Environment*, *951*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175752 Uber, T. M., de Oliveira Pateis, V., Cheute, V. M. S., dos Santos, L. F. O., de Figueiredo Trindade, A. R., Contato, A. G., dos Santos Filho, J. R., Corrêa, R. C. G., Castoldi, R., de Souza, C. G. M.,

Bracht, A., & Peralta, R. M. (2025). Immobilization of Trametes versicolor Laccase by Interlinked Enzyme Aggregates with Improved pH Stability and Its Application in the Degradation of Bisphenol A. *Reactions*, *6*(1). https://doi.org/10.3390/reactions6010009

Uber, T. M., Novi, D. M. P., Murase, L. Y., Cheute, V. M. S., Kagueyama, S. S., Contato, A. G., Peralta, R. A., Bracht, A., & Peralta, R. M. (2025). Decolorization and Detoxification of Synthetic Dyes by Trametes versicolor Laccase Under Salt Stress Conditions. *Reactions*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/reactions6040053

Yang, S. O., Sodaneath, H., Lee, J. I., Jung, H., Choi, J. H., Ryu, H. W., & Cho, K. S. (2017). Decolorization of acid, disperse and reactive dyes by Trametes versicolor CBR43. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, *52*(9), 862–872. https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1316164

Zhang, H., Liu, X., Liu, B., Sun, F., Jing, L., Shao, L., Cui, Y., Yao, Q., Wang, M., Meng, C., & Gao, Z. (2023). Synergistic degradation of Azure B and sulfanilamide antibiotics by the white-rot fungus Trametes versicolor with an activated ligninolytic enzyme system. *Journal of Hazardous Materials*, *458*. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131939

Zhang, H., Wang, Z., Li, F., Wang, L., & Ren, B. (2024). Immobilization of Laccase in β-Cyclodextrin Composite Hydrogel for Efficient Degradation of Dye Pollutants. *Catalysts*, *14*(8). https://doi.org/10.3390/catal14080473

Zosenko, O. O., Kushch, O. v., Kompanets, M. O., Anishchenko, V. M., & Shendrik, A. N. (2022). Aliphatic oxime 3-(hydroxyimino)pentan-2,4-dione as new potential mediator for laccase-catalyzed decolorization of dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(4). https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108149

López, A., García, E., & Martínez, R. (2023). Degradación de colorantes azoicos: caso del Rojo Directo 28. Revista de Investigación MCLIDI, Universidad La Salle. https://revistasinvestigacion.lasalle.mx/index.php/mclidi/article/download/4293/3933

Singh, P., Raizada, P., & Singh, P. (2025). Photocatalytic removal of textile wastewater-originated methylene blue and malachite green dyes using spent black tea extract-coated silver nanoparticles. PubMed. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39805978/