

Aplicación de hongos ligninolíticos para la biorremediación de aguas contaminadas con colorantes

**Ing. Beatriz Paulina von Ziegler Muñoz
Ing. Tamara Carolina Espinosa Aguilar
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad La Salle**

**Dr. Alejandro Islas García
Vicerrectoría de Investigación
Universidad La Salle**

Abstract

Due to the impact produced by human activities, different methodologies have been developed to mitigate and counteract the possible adverse effects on the environment. It occurs the same way for soil, air and water bioremediation.

This article seeks to call attention to the importance of addressing water pollution with dyes. Due to the above, a bibliographic review of the bioremediation methods used for treating dye contaminated water through the use of ligninolytic fungi was elaborated, while highlighting the most used species, as well as their mechanisms of action through the different enzymes involved. Likewise, the article highlights the need to reform environmental legislation, which should function as a tool to mitigate the ecological impact caused by the high concentration of colorants in industrial effluents.

Keywords

Biodegradation, ligninolytic enzymes, textile industry.

Resumen

Debido al impacto que generan las actividades humanas, se han desarrollado distintas metodologías para mitigar y contrarrestar los posibles efectos adversos sobre el medio ambiente. Tal es el caso de la biorremediación de suelo, aire y agua. En el presente artículo se busca crear conciencia en cuanto a la importancia de atender los problemas de contaminación del agua con colorantes, por ello se realizó una revisión bibliográfica de los métodos de biorremediación de colorantes empleados en procesos industriales, mediante el uso de hongos ligninolíticos o de la podredumbre blanca, destacando las

especies más utilizadas, así como sus mecanismos de acción a través de las diferentes enzimas involucradas. Asimismo, se pone de manifiesto los efectos adversos de estos contaminantes y la necesidad de reformar la legislación en materia ambiental, que debería fungir como una herramienta para mitigar el impacto ecológico ocasionado por la alta concentración de colorantes en los efluentes industriales.

Palabras clave

Biodegradación, enzimas ligninolíticas, industria textil.

Introducción

Uno de los sectores industriales más contaminantes y con mayor impacto ambiental es el dedicado al ámbito textil, debido al alto consumo de agua requerida para llevar a cabo sus procesos y las altas concentraciones de contaminantes presentes en las aguas residuales. Alrededor de 700,000 toneladas anuales de colorantes sintéticos son producidas a nivel mundial. Por otro lado, se estima que del 10 al 15 % de los colorantes utilizados se pierden durante el proceso de tinción, en el cual el colorante que no es fijado al textil se libera en el efluente de la fábrica contaminando al cuerpo receptor (Mohammad et al, 2010). Por esta razón, en el presente documento se analiza el potencial de diferentes especies de hongos ligninolíticos para la biorremediación de colorantes industriales en cuerpos de agua contaminados.

Por lo que se refiere a los procesos de biorremediación, estos consisten en la descontaminación de un medio o material mediante el uso del potencial metabólico de organismos como hongos o bacterias, para transformar las sustancias en compues-

tos más simples y menos contaminantes (Hernández-Ruiz et al, 2017). En cuanto a los hongos ligninolíticos, también conocidos como los hongos de la podredumbre blanca, son aquellos que tienen la capacidad de producir enzimas extracelulares capaces de degradar la lignina de la madera: dichas enzimas también son catalíticamente activas sobre diversos sustratos orgánicos y contaminantes recalcitrantes (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

Los colorantes

Estos compuestos químicos xenobióticos no se encuentran de forma natural en la biosfera, sino que han sido sintetizados por el hombre (Moeller y Garzón, 2003). Debido a que los colorantes presentan una elevada complejidad estructural y no suelen obedecer las mismas tendencias en cuanto a propiedades fisicoquímicas, su tratamiento antes de liberarse al medio ambiente suele ser limitado o incluso nulo.

El vertimiento de aguas contaminadas por colorantes, además de ocasionar impactos estéticos negativos, afecta a los organismos acuáticos fotosintéticos o productores primarios, que garantizan el flujo de energía a niveles tróficos superiores (Barrios-Ziolo et al, 2016).

Por otro lado, los colorantes poseen una elevada capacidad de bioacumulación y baja velocidad de despolimerización, propiedades que los hacen muy persistentes (Garzón, 2009). Debido a lo anterior, la presencia de colorantes en el medioambiente sin previo tratamiento supone riesgos ecológicos a causa de las propiedades fisicoquímicas de dichas sustancias (Figura 1).

Panorama del uso de los colorantes y su normatividad

A pesar de que el uso y aplicación de colorantes industriales, textiles, alimenticios, entre otros, es extensa, no existe ninguna Norma Oficial Mexicana (NOM) que determine los límites máximos permisibles de colorantes en aguas residuales. Únicamente en la NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil se menciona que, en caso de identificar alguna descarga que a pesar del cumplimiento de la NOM cause algún efecto negativo en el cuerpo receptor, se podrán establecer límites máximos permisibles -de considerarse necesario- para el color.

Por otro lado, la Ley Federal de Control de Contaminación del Agua, comúnmente conocida como Ley de Aguas Limpias (CWA por sus siglas en inglés), establece la regulación de los vertidos de contaminantes en las aguas de Estados Unidos; al igual que la regulación de las normas de calidad de las aguas residuales. Además, se han puesto en marcha programas para controlar la contaminación a través de normas que regulen las aguas residuales provenientes de la industria, entre otros (EPA, 2020). A pesar de lo anterior, no se han establecido límites máximos permisibles para la presencia de colorantes en aguas residuales o cuerpos de agua receptores. Asimismo, todos los estados han adoptado criterios narrativos de calidad del agua a fin de complementar los criterios numéricos. Dichos criterios se encargan de describir la calidad del agua deseada para un cuerpo de agua. Los criterios narrativos pueden indicar, por ejemplo, si los vertidos están libres de color,

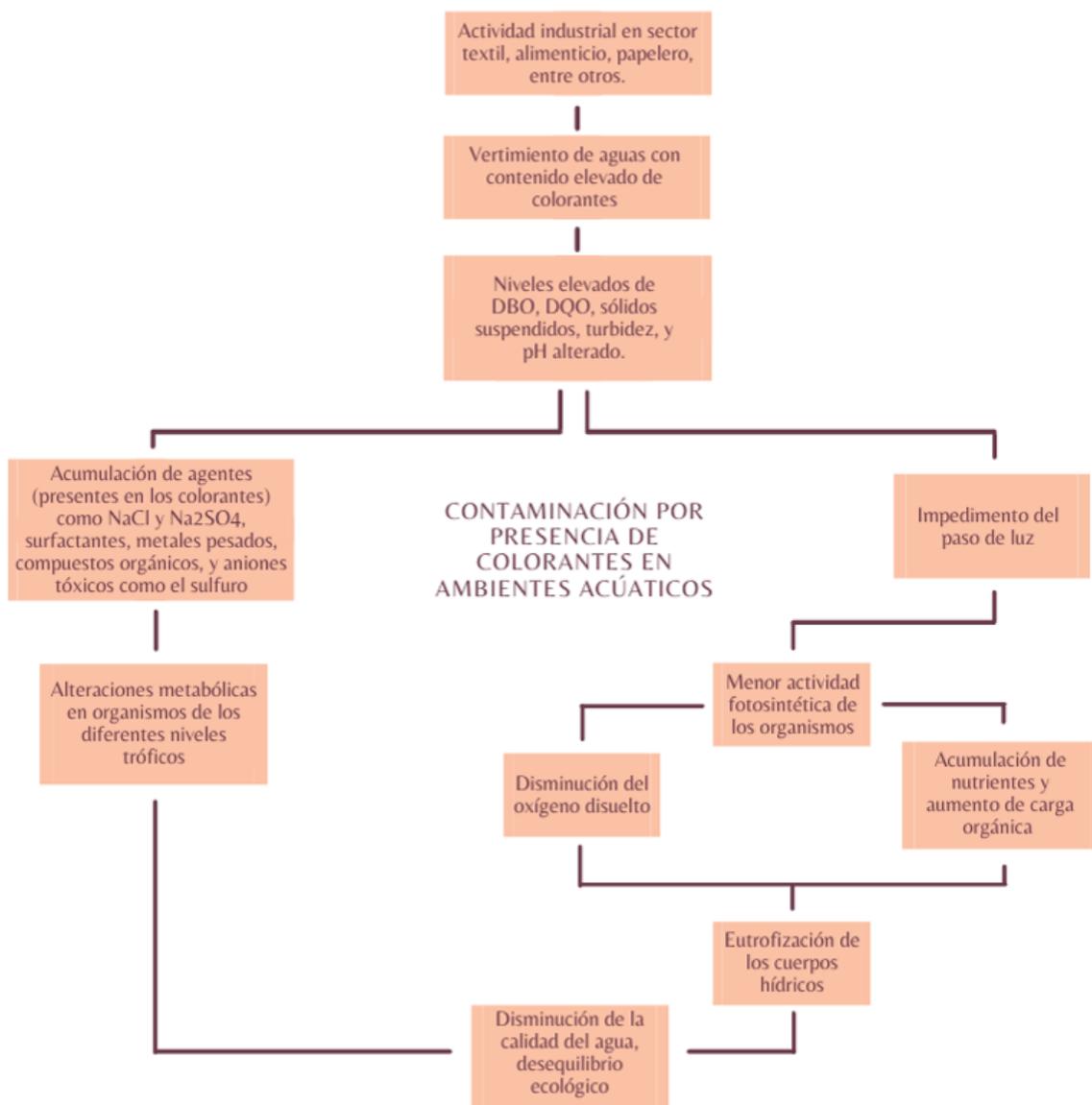


Figura 1: Efectos por contaminación de colorantes en ambientes acuáticos. Elaboración propia basado en Bráñez, 2018; Maldonado & Molina, 2011; Cortazar et al. 2014; Tkaczyk et al. 2020; Aristizábal y Bermúdez, 2007.

olor, sabor y turbidez. (NPDES, 2010).

(Corrales y Caycedo 2020).

Composición de los colorantes

La composición general de los colorantes consiste un grupo cromóforo y auxocromos. El primero es el responsable de la absorción de la luz y por lo tanto le da color a la molécula; los segundos representan al grupo funcional que le dan afinidad a la molécula hacia fibras y tejidos y amplían la longitud de onda a la que se absorbe el color, brindándole una mayor intensidad visual. Finalmente, los colorantes suelen tener un solubilizador, que por la presencia de iones le da afinidad al colorante con diversos solventes (Marcano, 2018).

Algunos ejemplos de grupos cromóforos son: N=O (nitroso), O-N=O (nitro), C=S (tiocarbonilo), C=O, (carbonilo), N=N (azo), N=N-O (azoxi), C=N (ciano), C=N (imino), C=C (etinilo). Entre los auxocromos, algunos ejemplos son: OH (hidroxi), NHMe (metilamino), NMe2 (dimetilamino), OR (alcoxi), Cl, Br, I, (halógenos) (Marcano, 2018).

Existen diversas formas de clasificar a los colorantes, una de ellas es de acuerdo con el grupo químico que los caracteriza (Tabla 1).

Debido a que los auxocromos influyen en la longitud de absorción del cromóforo: si la tendencia es hacia las longitudes de onda mayores, se habla de un desplazamiento batocrómico, por el contrario, si la absorción se da hacia las longitudes de onda menores se trata de un desplazamiento hipsocrómico

Contaminación de agua con colorantes

De acuerdo a la Conferencia de la ONU sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, 2019), la industria textil es la segunda más contaminante a nivel mundial, trayendo consigo múltiples impactos ambientales negativos como:

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

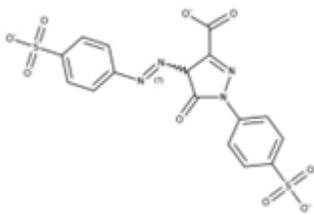
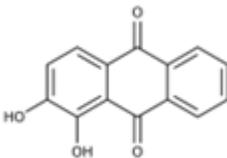
Clasificación Química	Características	Ejemplo
Azoicos	Son todos aquellos que poseen al menos un grupo R-N = N-R'. Estos son los colorantes más utilizados en el sector textil.	 <p>Tartrazina, coloración naranja</p>
Antraquinonas	Suelen tener uno o más grupos hidroxilo. La mayoría de los colorantes naturales pertenecen a esta clasificación.	 <p>Alirazina, coloración roja</p>

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

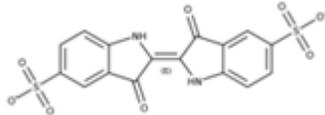
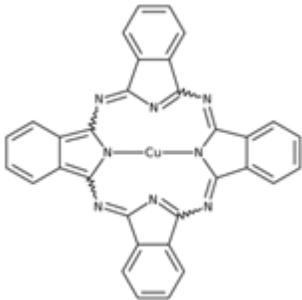
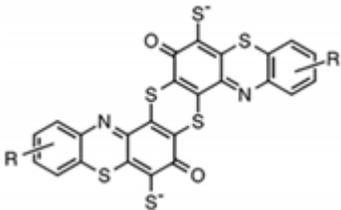
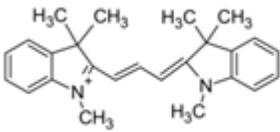
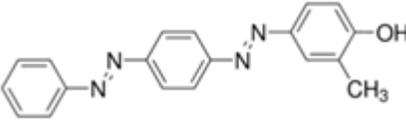
Clasificación Química	Características	Ejemplo
Ion arilcarbonio	Los colorantes que pertenecen a esta clasificación tienen al menos un átomo de carbono cargado positivamente. A este grupo pertenece el colorante índigo, que es de los más antiguos que se conocen.	 <p data-bbox="938 751 1399 789">Carmín de Índigo, coloración azul</p>
Ftalocianina	En su estructura poseen dos anillos fusionados (benceno y piridina). La ftalocianina es una molécula muy versátil, pues debido a su conformación estructural puede coordinar hasta 70 elementos en forma de iones metálicos o iones de hidrógeno, pero únicamente da coloraciones verdes y azules.	 <p data-bbox="987 1226 1349 1297">Ftalocianina de cobre (II), coloración azul</p>
Sulfuro	Son complejos poliméricos con azufre en su estructura, y para el proceso de teñido es necesario adicionar agentes reductores, lo que los hace altamente contaminantes. Los colorantes sulfurosos suelen dar lugar a tonos opacos como rojos, negros y cafés.	 <p data-bbox="1052 1612 1284 1684">Negro sulfuro 1, coloración negra</p>

Tabla 1. Clasificación de los colorantes según su grupo químico

Clasificación Química	Características	Ejemplo
Polimetino	Los colorantes de polimetina se caracterizan por tener una estructura lineal en cuyos extremos se encuentra un grupo donador y un sustractor de electrones. Uno de sus usos es en el área clínica, pues estos funcionan como marcadores fluorescentes de biomoléculas.	 <p>Astrafloxina, coloración roja</p>
Nitro	Son aquellos que poseen un nitrógeno ligado a dos oxígenos, - NO ₂ . Principalmente dan tonalidades amarillas.	 <p>Amarillo disperso 7</p>

Elaboración propia con información de Saura y Galindo, 2015; Gibaja y Salaverry, 1998; Pérez-Folch et al. 2006. Figuras obtenidas de Gaviria-Arroyave et al. 2018; Marcano, 2018.

- Alto consumo del recurso hídrico (93.000 millones de metros cúbicos de agua anualmente).
- Desperdicio de un 20% del agua total a nivel mundial.
- Emisión del 10% de los gases globales de efecto invernadero (850 toneladas/año).
- Producción del 20% de aguas residuales mundiales contaminadas principalmente con colorantes.
- Generación de medio millón de toneladas de microplásticos anuales en el proceso de lavado de textiles.

Existe una amplia variedad de sectores que emplean colorantes en sus procesos,

por lo tanto, es muy común que estas sustancias se encuentren presentes en los efluentes que son liberados al medio ambiente por dichas industrias, que van desde la textil, la industria papelera, de curtiduría, la cosmetológica, farmacéutica, alimenticia, la industria de la medicina y la medicina veterinaria entre otras (Tkaczyk et al, 2020). Por presentar un ejemplo, se estima que aproximadamente de 105,000 a 280,000 toneladas de colorantes textiles se pierden cada año en la industria textil y se descargan directamente en ambientes acuáticos (Maas y Chaudhari, 2005).

Caracterización y detección de colorantes en México

Río Zahuapan, Tlaxcala.

Por medio de un estudio llevado a cabo en

el Río Zahuapan, considerado la principal corriente hidrológica en el estado de Tlaxcala, fue posible identificar los problemas de contaminación originados por los desechos vertidos al Sistema hidrológico Atoyac-Zahuapan, provenientes de distintas actividades industriales. En el afluente de Atenco las industrias conurbadas se dedican al reciclaje de papel. Dentro de sus principales desechos se encuentran: celulosa, grasas, aceites y colorantes. Mientras que en la Confluencia Apizaquito-Atenco, se encontraron colorantes, hidróxido de sodio, grasas y aceites. Por otro lado, en el Arroyo Atlixnac, las industrias descargan celulosa y sales originadas de colorantes y ácido sulfónico. La contaminación de estos cuerpos de agua ocasiona serios problemas a la salud pública y a los ecosistemas acuáticos por las grandes cantidades de materiales tóxicos que han sido liberados a las aguas superficiales (Jiménez -Guillén y Hernández-Rodríguez, 2011).

Río Atoyac, Puebla-Tlaxcala

A lo largo de las comunidades de San Martín Texmelucan, Puebla y Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala; se han establecido fábricas textiles productoras de tela de mezclilla para la confección de jeans (Denim), las cuales generan grandes cantidades de agua residual con distintos contaminantes como los colorantes que, en la mayoría de los casos, son vertidas sin un tratamiento adecuado (Figura 2). Estos efluentes son generalmente alcalinos, calientes y están altamente coloreados, contribuyendo enormemente a la contaminación y deterioro del agua del río. La carga contaminante y la toxicidad de los efluentes textiles es dos a tres veces mayor que el agua residual urbana. Se determinó que la cantidad de colorante índigo en el agua residual es de 34.9 mg/L. Además de tener grandes concentraciones de este colorante, existen otros parámetros que se encuentran fuera de los límites máximos permisibles indicando el



Figura 2. Contaminación del Río Atoyac por producción de mezclilla. Recuperado de (Olguín y Rojas, 2017).

estado crítico en el que el Río Atoyac se encuentra actualmente (Estrada-Rivera, 2018).

Toxicología ambiental de los colorantes

En cuanto a la evaluación de riesgo toxicológico por presencia de colorantes en ambientes acuáticos es necesario considerar los diferentes niveles tróficos de los organismos en el sitio afectado, por lo tanto se deben hacer pruebas en algas, plantas, invertebrados y vertebrados, además de microorganismos como bacterias y protistas, esto con el fin de determinar qué organismos son más susceptibles a la exposición de los distintos grupos químicos en los que se clasifican los colorantes.

A partir de ensayos toxicológicos llevados a cabo por diferentes autores en organismos situados en distintos niveles de la red trófica, algunos de los efectos observados en ambientes acuáticos contaminados con colorantes se muestran en la Tabla 2.

Biorremediación de colorantes con hongos

Los hongos ligninolíticos mejor conocidos como hongos de la podredumbre blanca, se han popularizado por su potencial para degradar compuestos recalcitrantes como los hidrocarburos poliaromáticos, explosivos, plaguicidas, tintes, entre otros. Esto se debe principalmente a que poseen un complejo de enzimas oxidativas extracelulares que, en condiciones naturales, tienen la función de degradar la lignina de los organismos vegetales (Cardona et al, 2009). Los colorantes son comúnmente clasificados como compuestos recalcitrantes ya que estos no son biodegradables y tienden a acumularse en los organismos vivos causando enferme-

Tabla 2. Toxicología ambiental de colorantes azoicos probados en distintos organismos.

Tipo de organismo	Efectos toxicológicos reportados
Protistas ciliados	Inhibición del crecimiento, deformación celular, disminución en la capacidad de ingestión
Protistas (Algas)	Disminución del peso seco y del tamaño celular, bioacumulación celular
Invertebrados (crustáceos)	Aumento de actividad enzimática
Vertebrados (peces)	Daño en las branquias e insuficiencia renal
Vertebrados (peces)	Deposición del colorante en las branquias y línea lateral, aparición de manchas negras o cafés en el cerebro

Modificado de Tkaczyk et al. 2020.

dades y trastornos (Zaruma-Arias, et al, 2018).

Dentro de las enzimas extracelulares se incluyen la Lignino Peroxidasa, Manganeso Peroxidasa, Lacasas y Oxidasas, las cuales a través de diferentes rutas metabólicas son responsables de la degradación de la lignina y algunos compuestos similares (Rojas-Verde, 2010). Debido al gran potencial de degradación de compuestos recalcitrantes por parte de los hongos de podredumbre blanca, existe un amplio interés por implementar técnicas de biorremediación mediante el uso de tecnologías enzimáticas (Whiteley y Lee, 2006).

Por lo anterior, se han realizado múltiples investigaciones con las que se han determinado las especies de hongos más eficaces para la degradación de colorantes en el tratamiento biológico (Tabla 3).

Tabla 3. Especies de hongos de la podredumbre blanca utilizadas para la degradación de colorantes.

Especie	Mecanismo de acción
<i>Bjerkandera adusta</i>	Manganeso Peroxidasa
<i>Cyathus bulleri</i>	Lacasa
<i>Funalia trogii</i>	Adsorción, biodegradación
<i>Lentinula edodes</i>	Lacasa
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Lignino Peroxidasa
<i>Phlebia radiata</i>	Peroxidasa
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Peroxidasa
<i>Pycnoporus cinnabarinus</i>	Lacasa
<i>Trametes versicolor</i>	Biosorción, ligninasa
<i>Trametes hispida</i>	Lacasa

Modificado de Rojas-Verde, 2010.

Algunas de las especies que pueden emplearse para la biorremediación de agua contaminada con colorantes se muestran en la Figura 3.

En los últimos años se ha puesto de manifiesto el interés en aplicar técnicas sustentables con la finalidad de que los

procesos de producción sean cada vez más limpios. Los principales tratamientos biológicos efectivos para la decoloración y degradación de colorantes en aguas residuales industriales son la biosorción, biorremediación y biodegradación.

En la biosorción, las moléculas del colorante se unen a la biomasa, mientras que en el proceso de la biodegradación las enzimas transforman las moléculas tóxicas de los colorantes a compuestos simples y menos tóxicos (Ruíz et al, 2018).

En el caso de los hongos, las paredes celulares fúngicas contienen gran cantidad de polisacáridos y proteínas. Estos biopolímeros ofrecen grupos funcionales como carboxilos, hidroxilos, sulfatos, fosfatos y grupos amino, los cuales pueden unirse a otros iones (Cabrera, et al. 2016). Lo anterior les confiere una capacidad única a los hongos para capturar los grupos cromóforos de los colorantes y los metales pesados presentes en algunas de estas estructuras.

Por otro lado, los hongos utilizan el oxígeno molecular como aceptor final de electrones, y la vía metabólica que utilizan para producir su energía interna es a partir de la glucólisis en el citoplasma y ciclo de Krebs en la mitocondria (Kirk y Cullen, 1998).

En la Tabla 4 se mencionan algunos antecedentes de biorremediación de cuerpos de agua contaminados con colorantes empleando distintas especies de hongos ligninolíticos realizados por distintos autores.

Enzimas ligninolíticas en el proceso de biorremediación de colorantes Como se



Figura 3. *Phlebia radiata* (a), *Pleurotus ostreatus* (b), *Trametes versicolor* (c), *Lentinula edodes* (d). Recuperadas de Gelpi, 2016a, 2016b, 2016c y Dechaume, 2002.

Tabla 4. Casos de biorremediación de aguas contaminadas con colorantes utilizando hongos ligninolíticos.

Organismo empleado para biorremediación	Sustancia contaminante	Enzima	Tiempo de aplicación/ remoción del colorante	Eficiencia del tratamiento	Referencia
<i>Phanerochaete sordida</i>	Rojo 120	Manganeso peroxidasa	7 días	90.6 %	Harazono et al., 2003.
<i>Trametes villosa</i> y <i>Trametes versicolor</i>	Colorante Triactive Navy PN2R (colorante catiónico con polisulfito de sodio)	-	1 hora	20 %	Cabrera et al. 2016
<i>Pleurotus ostreatus</i> (Jacq. ex Fr) Kumm	Azul turquesa	Lignino Peroxidasa	20 días	76,93 a 100 mg/L, 69,25 a 200 mg/L y 84,76 % a 400 mg/L	Ruíz et al., 2018.
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Colorantes azoicos (colorantes derivados de hidrocarburos empleados en la industria textil)	Lacasa	14 días	94.4 %	Vallejo-Aguilar, 2021.

mencionó anteriormente, los hongos de la podredumbre blanca son considerados los organismos más eficientes al mineralizar en su totalidad la lignina, y las mismas enzimas que les proveen dicha capacidad, también pueden degradar sustancias recalcitrantes como son los colorantes. En la Figura 4 se muestran la estructura de las enzimas ligninolíticas y a continuación se mencionan algunas de sus características:

- Lignino peroxidasa (LiP)

Esta enzima oxidoreductasa se distingue de otras enzimas por su pH bajo y su alto potencial redox, lo cual le permite oxidar compuestos no fenólicos. Emplea peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos (Rojas-Verde, 2010; Castillo, 2010; Bloding, 1998).

- Manganeso peroxidasa (MnP)

Se caracteriza por ser la segunda enzima peroxidasa mayormente producida por los hongos ligninolíticos. Su principal sustrato son los ácidos orgánicos tales como el oxalato, lactato y malonato, por lo tanto, es más específica que la LiP. Es una enzima ligninolítica extracelular que oxida Mn^{+2} hasta la especie oxidante Mn^{+3} por medio del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como oxidante (Rojas-Verde, 2010; Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

- Peroxidasa versátil (VP)

Se encarga de conjugar las propiedades catalíticas de las dos enzimas anteriormente mencionadas, es decir; LiP y MnP, pues combina ambos ciclos dependiendo del sustrato a degradar. Posee gran afinidad hacia los colorantes (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

- Lacasa

Enzima perteneciente a la familia de las

polifenol oxidasas, por esta razón pueden oxidar un sustrato fenólico y a su vez iniciar una reacción de polimerización. De igual forma pueden oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos. Su potencial redox es bajo, sin embargo, logran degradar compuestos recalcitrantes, como los colorantes, a través de mediadores redox (Castillo, 2010).

Dichas enzimas pueden actuar en conjunto o separadas, en función de las facultades del hongo ligninolítico para producir una o más de estas sustancias (Dávila y Vázquez-Duhalt, 2006).

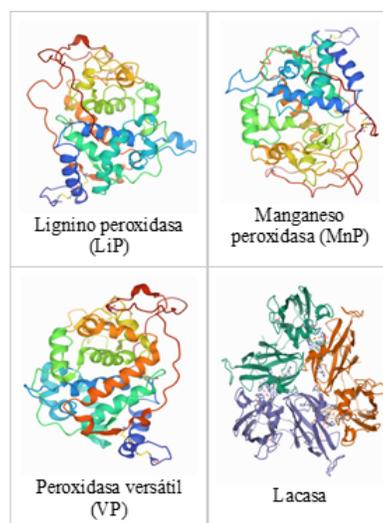


Figura 4. Estructura enzimas ligninolíticas utilizadas para la degradación de colorantes.

Recuperadas de RCSB, 2021.

Mecanismos de degradación de colorantes por hongos

Para comprender cuál es el papel que desempeñan las enzimas fúngicas en el proceso de degradación de colorantes, pueden revisarse las Figuras 5 y 6, en las que, respectivamente, se muestran los me-

canismos de reacción de la biodegradación del colorante violeta 5, y de un colorante derivado de la ftalocianina, ambos a través de la ruta enzimática de la peroxidasa versátil.

Alternativas para aplicación en campo

Se tiene algunos registros de que, a partir del año 2000, ya había interés por parte de algunos investigadores en desarrollar procesos basados en la enzima lacasa por su gran potencial en la decoloración de colorantes sintéticos. Una de las aplicaciones es el tratamiento de efluentes textiles. La fuente de lacasa provenía de las siguientes especies: *Corioloropsis gallica*, *Gliocladium virens*, *Lentinula edodes*, *Panus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sp*, *Pycnoporus coccineus*, *Rhus vernicifera*, *Trametes sp. strain AH28-2*, *Trametes versicolor* (Rodríguez y Toca, 2006).

Una de las alternativas de aplicación en campo es la biosorción, que consiste en la acumulación de sustancias químicas en biomasa, la cual puede utilizarse viva o muerta (Garzón, 2009). Los organismos fúngicos son aptos para llevar a cabo dicho proceso debido al alto contenido de proteínas y polisacáridos presentes en sus estructuras, y por los grupos carboxilos, hidroxilo, sulfato, fosfato y aminos, que a su vez pueden unirse a los iones presentes en las sustancias que se desean remover, en este caso los colorantes (Bayramoglu y Arica, 2006).

Conclusiones

Actualmente la ciencia está buscando alternativas para remediar la contaminación en suelo, agua y atmósfera, utilizando métodos más amigables con el medio ambiente a tra-

vés de la biotecnología: la biorremediación con hongos ligninolíticos es una opción altamente viable por su potencial para degradar colorantes presentes en efluentes provenientes de la industria. La capacidad degradadora varía de acuerdo con la especie de hongo utilizada, sin embargo, en distintos estudios se ha demostrado que la concentración de colorantes en agua una vez aplicado el tratamiento con las especies conocidas, es mucho menor a su concentración inicial.

Por otro lado, es fundamental realizar reformas a la legislación ambiental en México y en otros países. Se deben incorporar las regulaciones correspondientes sobre los límites máximos permisibles de colorantes en ambientes acuáticos, fundamentados en estudios e investigaciones que demuestren el riesgo potencial de todos aquellos factores que afectan la salud de los ecosistemas acuáticos, así como los requerimientos de calidad de agua establecidos.

Finalmente es necesario recalcar la importancia de atender las regiones de emergencia ambiental derivadas de la contaminación de agua con colorantes, pues al ser sustancias poco reguladas, los cuerpos hidrológicos afectados por estas no suelen recibir la atención pertinente.

Referencias

Aristizábal, A. y Bermúdez, C., 2007. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. Facultad de ingeniería química de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Disponible en <https://docplayer.es/28510680-Estudio-de-la-factibilidad-de-un-sistema-de-electrocoagulation-para-tratamiento->

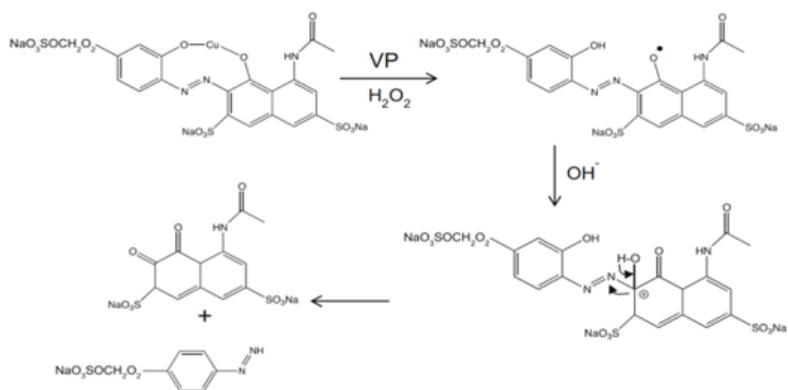


Figura 5. Mecanismo de degradación del colorante azoico violeta 5, por *Bjerkandera adusta* a través de la ruta enzimática con Peroxidasa Versátil (VP). Obtenido de Baratto et al, 2015.

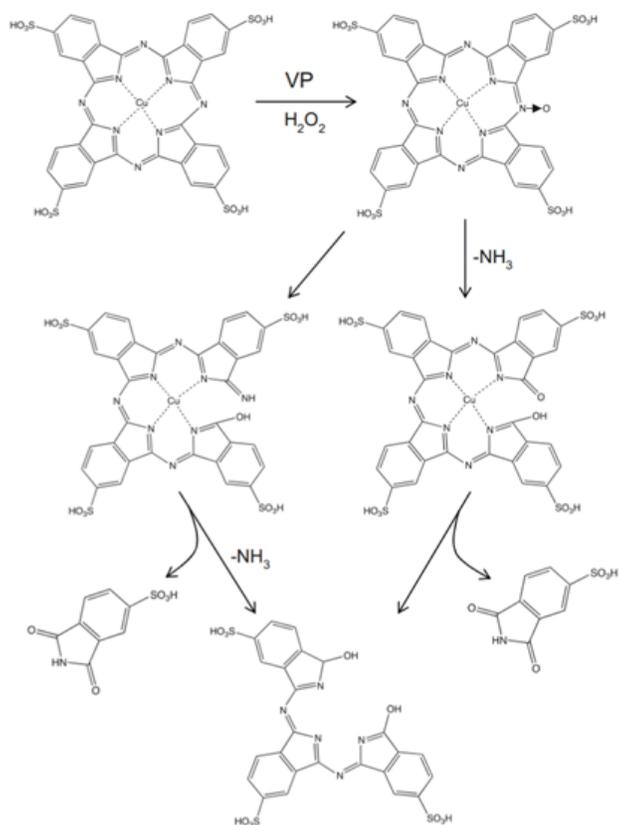


Figura 6. Mecanismo de degradación de colorante derivado de la ftalocianina, por *Bjerkandera adusta* a través de la ruta enzimática con Peroxidasa Versátil (VP). Obtenido de Baratto et al, 2015.

de-aguas-procedentes-de-lavanderias-industriales-con-fines-de-reuso.html Consultado el 15 de julio de 2021.

Baratto, M.C., et al, 2015. EPR and LC-MS studies on the mechanism of industrial dye decolorization by versatile peroxidase from *Bjerkandera adusta*. National Center for Biotechnology Information, United States. Disponible en <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25567062> Consultado el 29 de julio de 2021.

Barrios-Ziolo, L. F., Gaviria-Restrepo, L. F., Agudelo, E. A. y Cardona-Gallo, S. A. Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el área metropolitana del Valle de Aburrá, Rev. EIA, 13 [26], pp. 61-74, 2016.

Bayramoglu, G., y Arica, Y. Biosorption of benzidine based textile dyes "Direct Blue 1 and Direct Red 128" using native and heat treated biomass of *Trametes versicolor*, J. Hazard. Mater., 143, pp. 135-143, 2006.

Bloding, W., Doyle, W. A., Smith, A. T., Winterhalter, K., Choinowski, T. y Piontek, K. Autocatalytic formation of a hydroxy group at C6 of Trp171 in lignin peroxidase, Biochemistry, 37 [25], pp. 8832-8838, 1998.

Bráñez S. M. 2018. Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. Universidad de San Martín de Porres, Perú. Disponible en: <https://www.aulavirtualusmp.pe/ojs/index.php/rc/article/view/1369/1519> Consultado el 8 de julio de 2021.

Cabrera, I. et al, 2016. Evaluation of the adsorption capacity of the fungi *trametes villosa* residual from the

removal process of the dye triactive navy pn2r. Scielo. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612016000300001 Consultado el 28 de julio de 2021.

Cardona, M., Osorio, J. y Quintero, J. Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, 48, pp. 27-37, 2009.

Castillo, A. G. M. 2010. Aislamiento de hongos lignocelulolíticos a partir de residuos agroindustriales de plátano. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Disponible en: <https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1003/637> Consultado el 6 de julio de 2021.

Corrales. R. L. C. y Caycedo L. L. 2020. Principios fisicoquímicos de los colorantes utilizados en microbiología. Universidad Colegio mayor de Cundinamarca. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/342729051_Principios_fisicoquimicos_de_los_colorantes_utilizados_en_microbiologia_Principios_fisicoquimicos_de_los_colorantes Consultado el 26 de junio de 2021.

Cortazar, M. A., Coronel, O. C., Escalante, L., A. y González, R. C. 2014. Contaminación generada por colorantes de la industria textil. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html> Consultado el 22 de mayo de 2021.

Dávila, G. y Vázquez-Duhalt, R. Enzimas ligninolíticas fúngicas para fines ambientales. Mensaje Bioquímico, 30, pp. 29-55, 2006.

- Dechaume, J. P. 2002. *Lentinus edodes*. Asociación cultural "Baxauri" Kultur el-kartea. Mikologia. Bajauri. Disponible en: <http://www.fichasmicologicas.com/?micos=1&alf=1&art=335> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- EPA. Summary of the Clean Water Act. 2020. Disponible en: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act> Consultado el 7 de julio de 2021.
- Estrada-Rivera, A. 2018. Evaluación toxicológica del agua residual textil (proceso denim) vertida al Río Atoyac. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/7620> Consultado el 29 de junio de 2021.
- Garzón, J. R. C. 2009. Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de Agave tequilana Webber var. Azul. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8222/tesis217.pdf?sequence=1> Consultado el 23 de junio de 2021.
- Gaviria-Arroyave, M., Osorio-Echavarría, J. y Gómez-Vanegas, N. 2018. Evaluación del escalamiento de un reactor para el tratamiento de efluentes textiles usando *Bjerkandera sp.* Colombia. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302018000300080 Consultado el 25 de julio de 2021.
- Gelpi, C. 2016a. *Phlebia radiata*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/phlebia-radiata/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gelpi, C. 2016b. *Pleurotus ostreatus*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/pleurotus-ostreatus/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gelpi, C. 2016c. *Trametes versicolor*. Sociedad Micológica Extremeña. Disponible en: <https://micoex.org/2016/09/17/trametes-versicolor/> Consultado el 2 de agosto de 2021.
- Gibaja, O. S. y Salaverry, G. O. Pigmentos naturales quinónicos. UNMSM, Fondo Editorial. 277 p, 1998.
- Harazono, K., Watanabe, Y. y Nakamura, K. Decolorization of azo dye by the white-rot basidiomycete *Phanerochaete sordida* and by its manganese peroxidase. J. Biosci. Bioeng., 95 [5], pp. 455-459, 2003.
- Hernández-Ruíz, G. M., Álvarez-Orozco, N. A. y Ríos-Ororio, L. A. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática. Corpo. Cienc. Tecnol. Agropecuaria, 18 [1], pp. 139-159, 2017.
- Jiménez-Guillén, R. y Hernández-Rodríguez, M. Zahuapan: río-región-contaminación. El Colegio de Tlaxcala, A. C, México, pp. 29-100, 2011.
- Kirk, T.K., y Cullen, D., Enzymology and molecular genetics of wood degradation by white-rot fungi., Environmentally Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry, pp. 273-301,1998.
- Maas, R. y Chaudhari, S. Adsorption and

- biological decolourization of azo dye Reactive Red 2 in semicontinuous anaerobic reactors, *Process Biochem.*, 40 [2], pp. 699-705, 2005.
- Maldonado, R. A. y Molina, A. R. 2011. Estudio para la reducción de colorantes de las aguas residuales de la industria textil a través de procesos electroquímicos. Facultad de Ciencias agropecuarias y ambientales de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Ecuador. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1508/13/UPS-CT002191.pdf> Consultado el 8 de julio de 2021.
- Marcano, D. 2018. Introducción a la química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254 p, 2018. <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>
- Moeller, G.E. y Garzón, M.A. Desarrollo de Tecnologías no Convencionales para el Tratamiento de Efluentes de la Fabricación de Colorantes del tipo Azo, *Anuario Imta.* 23, pp. 123-129, 2003.
- Mohammad, A., Al-Ghouti, J. Li., Yousef, S. N., Al-Laqtah, G. W. y Mohammad N. M. A. Adsorption mechanisms of removing heavy metals and dyes from aqueous solution using date pits solid adsorbent. *Journal of Hazardous Materials* 176, pp. 510-520, 2010.
- Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4794015&fecha=18/10/1993 Consultado el 6 de junio de 2021.
- NPDES, 2010. CHAPTER 6. Water Quality-Based Effluent Limitations. National Pollutant Discharge Elimination System Permit Writers' Manual. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/pwm_chapt_06.pdf Consultado el 8 de julio de 2021.
- Olguín, M. y Rojas, D. 2017. La producción de mezclilla contamina el río Atoyac. UNAM Global. Disponible en: <https://unamglobal.unam.mx/la-produccion-de-mezclilla-contamina-el-rio-atoyac/> Consultado el 29 de junio de 2021.
- Pérez-Folch, J. et al, 2006. Reducción electroquímica de colorantes sulfurosos. Vías de proceso. Universitat Politècnica de Catalunya, España. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/4693/7/reducci%F3n%20electroqu%EDmica.pdf;jsessionid=23A7051A80ADFE472377D6AD8F1729D4?sequence=1> Consultado el 24 de junio de 2021.
- RCSB, 2021. Protein Data Bank. Disponible en: <https://www.rcsb.org/> Consultado el 20 junio de 2021.
- Rodríguez, C. S. y Toca, H. J. L. Industrial and biotechnological applications of laccases: A review, *Biotechnol. Adv.*, 24, pp. 500-513, 2006.
- Rojas-Verde, M. G. 2010. Producción de enzimas lignolíticas por hongos de pudrición blanca aislados en Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Disponible en:

<http://eprints.uanl.mx/2244/1/1080190928.pdf> Consultado el 7 de junio de 2021.

Ruíz, L., Iannacone, J., Tocto, I., Ruíz, A. y Harirchian, P. Acción de *Pleurotus ostreatus* (JACQ. EX FR) Kumm en la remoción del colorante azul turquesa en biorreactores airlift. *The Biologist* (Lima), 16 [2], pp. 221-235, 2018.

tamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión Textil e Industrial. *Rev. Facultad de Ciencias Químicas*, [18], 2018.

Saura, A. y Galindo, F. Utilización del colorante índigo en el laboratorio docente de Química Orgánica, *Educación Química*, 27 [2], pp. 133-138, 2015.

Tkaczyk, A., Mitrowska, K. y Posyniak, A. Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review, *Sci. Total Environ.*, 717, 2020.

UNCTAD, 2019. El costo ambiental de estar a la moda. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/04/1454161> Consultado el 3 de junio de 2021.

Vallejo-Aguilar, M. L. A. 2021. Utilización de Lacasa de *Pleurotus ostreatus* y su biomasa residual para la degradación de colorantes azoicos y la remoción de metales en aguas residuales. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/12695> Consultado el 30 de junio de 2021.

Whiteley, C.G., y Lee, J. Enzyme technology and biological remediation, *Enzyme Microb. Technol.*, 38, pp. 291-316, 2006.

Zaruma-Arias, P. E., Proal-Nájera, J. B., Chaires-Hernández, I. y Salas-Ayala, H. I. Los Colorantes Textiles Industriales y Tra-