

Ensayo *in vitro* para remoción de mercurio en aguas, utilizando el hongo del género *Trametes* sp.

In vitro studies for removal of mercury in water, using fungus genera *Trametes* sp.

Elsy Karenth Figueroa Mosquera*, Luis Alejandro Carmona Jiménez**, Susana Ochoa Agudelo***

DOI: 10.15446/rev.colomb.biote.v27n2.116390

RESUMEN

El mercurio es un contaminante altamente tóxico, su dispersión afecta la salud humana, animal y el equilibrio ambiental, debido a los diferentes derivados que produce y su alta biodisponibilidad. El mercurio orgánico, particularmente el metilmercurio (MeHg), se acumula en alimentos como el pescado, mientras que el etilmercurio puede ingresar al cuerpo humano por medio de conservantes de vacunas y algunos antisépticos. De esta manera, se evidencia la importancia de encontrar mecanismos eficaces que permitan minimizar la presencia de iones metálicos del mercurio, siendo la biorremediación un mecanismo alternativo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de *Trametes* sp. para la remoción del mercurio en medio acuoso. El material fúngico recolectado cumplió con características morfológicas macroscópicas y microscópicas para el género *Trametes* sp. Cuatro hongos fueron seleccionados para continuar con el ensayo de tolerancia al metal, el cual se analizó a partir del crecimiento radial en medio sólido. Para el ensayo de remoción de mercurio en solución acuosa, los hongos se expusieron en una concentración de 15 mg/L de mercurio, para lo cual se logró una remoción de 2.40 mg/L del metal. La secuenciación de la región ITS del material fúngico, confirma la identidad (99.13 %) de un hongo correspondiente a *Trametes* sp. Se propone al hongo *Trametes* sp. como material fúngico promisorio en el proceso de remoción de mercurio, teniendo en cuenta que es indispensable profundizar en el mecanismo que esta emplea, con la finalidad de optimizar su aplicación en procesos de biorremediación.

Palabras clave: metal pesado, biorremediación, biosorción, biomasa fúngica, tolerancia al mercurio.

ABSTRACT

Mercury is a highly toxic pollutant. Its dispersion affects human and animal health and environmental balance due to the different derivatives it produces and its high bioavailability. Organic mercury, particularly methylmercury (MeHg), accumulates in foods such as fish, while ethylmercury can enter the human body through vaccine preservatives and some antiseptics. This highlights the importance of finding effective mechanisms to minimize the presence of mercury metal ions, with bioremediation being an alternative mechanism. The objective of this study was to evaluate the capac-

* Biotecnóloga, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, IUCMA

** Estudiante de Biotecnología, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, IUCMA

*** MSc Biotecnología, Docente Investigador, Grupo Biociencias, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, IUCMA

ity of *Trametes* sp. to remove mercury in an aqueous medium. The fungal material collected had the macroscopic and microscopic morphological characteristics for the genus *Trametes* sp. Four fungi were selected to continue with the metal tolerance test, which was analyzed based on radial growth in solid medium. For the mercury removal test in aqueous solution, the fungi were exposed to a concentration of 15 mg/L of mercury solution, achieving a removal of 2.40 mg/L of the metal. Sequencing of the ITS region of a fungal material confirms the identity (99.13%) of the fungus corresponding to *Trametes* sp. The fungus *Trametes* sp. is proposed as a promising fungal material in the mercury removal process, bearing in mind that it is essential to further investigate the mechanism it uses in order to optimize its application in bioremediation process.

Key words: heavy metal, bioremediation, biosorption, fungi biomass, mercury tolerant.

Recibido: septiembre 25 de 2024

Aprobado: 20 de octubre de 2025

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los metales pesados no esenciales constituyen un problema importante a nivel de diferentes ecosistemas. El agua potable y otros efluentes de agua natural, aguas residuales y el suelo, son espacios donde los metales pesados tienen un impacto negativo (Upadhyay *et al.*, 2023). Los metales pesados son altamente venenosos, cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos para los humanos, animales, plantas y su entorno (Londoño, 2020). Uno de los problemas más graves asociados a la persistencia de estos elementos en el ambiente, es la bioacumulación y la biomagnificación en la cadena trófica, resultando así en problemas para la salud, aumentando el daño en los ecosistemas (Lizarazo *et al.*, 2020). Los metales pesados se dispersan en el medio ambiente a través de efluentes industriales, desechos orgánicos, quema de basura, transporte, generación de energía, explotación minera; pueden ser transportados a kilómetros de distancia desde la fuente a través del viento, la tierra o por la superficie, y/o vías fluviales (Molina *et al.*, 2021).

El término metal pesado aplica a un grupo de metales y metaloides con una densidad atómica superior a 4 g/ml, o al menos 5 veces mayor que la densidad del agua. La exposición humana a metales pesados como el arsénico puede ser a través del agua potable, cultivos, alimentos procesados, verduras, hongos y productos animales (Lizarazo *et al.*, 2020). Se han identificado altas concentraciones de metales pesados y metaloides, como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) en diferentes fuentes alimentarias (L. Chen *et al.*, 2022), siendo la causa principal el uso de agua contaminada con metales, para su riego (Lucero Rincón *et al.*, 2023). Por ejemplo, la acumulación excesiva de metales pesados en cuerpos de agua puede causar daño oxidativo en plantas acuáticas, reducir la absorción de nutrientes y afectar el desarrollo de los animales acuáticos (L. Chen *et al.*, 2022). La acumulación de metales pesados en los animales terrestres puede reducir su competitividad,

viabilidad y el tamaño de las poblaciones, resultando en un desequilibrio ecológico (Molina *et al.*, 2021). Los metales pesados pueden ingresar a los tejidos vivos a través de la exposición a la contaminación atmosférica o del agua, y la biomagnificación, a través de la cadena alimentaria, lo que lleva al desarrollo de una serie de enfermedades como: defectos neurológicos y efectos dermatológicos, daño renal, tumores y cánceres, en diferentes organismos vivos (Lizarazo *et al.*, 2020).

Dentro de estos metales pesados, se encuentra el mercurio, el cual puede ser identificado en el ambiente en diferentes formas, incluyendo el mercurio metálico (Hg), el mercurio inorgánico, al que las personas pueden estar expuestas de acuerdo a su actividad laboral, así como el mercurio orgánico, en forma de metilmercurio (Me-Hg), que puede ingresar al cuerpo humano a través de los alimentos como el pescado, y el etilmercurio (Et-Hg) que puede ingresar al cuerpo por medio de conservantes de vacunas y algunos antisépticos (Londoño, 2020). Según los registros históricos de contaminación por metales pesados, Colombia es el tercer consumidor de mercurio a nivel mundial con fines de minería artesanal para la extracción de oro lo cual facilita procesos de amalgamación (L. Chen *et al.*, 2022). Esta actividad se ha convertido en la principal fuente de exposición a este metal, a nivel global y nacional (Sarria-Villa *et al.*, 2020). También es usado para la liberación de otros metales del material madre por diferentes procesos físicos y químicos llevados a cabo durante la extracción.

Por otro lado, la remediación ambiental de metales pesados, implementa estrategias de carácter físico, químico y/o biológico. La remediación física incluye principalmente métodos como el uso de resinas de intercambio iónico, separación por membranas y extracción con fluidos supercríticos (Kumar *et al.*, 2021). La remediación química incluye procesos como la precipitación química, coagulación, oxidación, redox químico y electrolisis (N. Chen *et al.*, 2023). Generalmente, los enfoques físicos y químicos

son capaces de eliminar un amplio espectro de contaminantes, pero las desventajas de estos métodos radican en alto consumo de energía, escalado del tratamiento, la necesidad de productos químicos adicionales y la contaminación secundaria (Londoño, 2020).

Dentro de los métodos de origen biológico para remover metales pesados en el ambiente, ha sido reportado el uso de las plantas (fitorremediación) y la biorremediación utilizando bacterias, hongos (micorremediación), algas (ficorremediación), entre otros microorganismos (Upadhyay *et al.*, 2023). Estos métodos, han resultado ser estrategias eficientes y amigables con el medio ambiente. La micorremediación es una estrategia económica, eficiente y ecológicamente sólida para contrarrestar la creciente crisis de contaminación acuática y terrestre (Kumar *et al.*, 2021). Las ventajas de usar hongos en procesos de biorremediación se deben principalmente a las características que presenta el material fúngico como biomasa (viva o muerta), la inmensa red de hifas, además de la basta producción de enzimas extracelulares multipropósito. Su principal efecto ha sido reportado alrededor de la relación entre el área de superficie que pueden colonizar sus hifas, y el volumen en masa que pueden generar su micelio, para la interacción con contaminantes complejos. La adaptación de este material biológico a diferentes condiciones ecológicas, entre ellas la fluctuación del pH y la temperatura en ambiente, permite la expresión de proteínas que intervienen en procesos de unión a metales de manera eficiente (Firinčá *et al.*, 2024). Los hongos pueden bioacumular metales tóxicos de aguas y suelos contaminados de manera estable y eficiente (Meyer *et al.*, 2023).

El hongo *Trametes sp.* ha sido contemplado como una alternativa para procesos de biorremediación de metales pesados. *Trametes versicolor* es uno de los hongos basidiomicetos más conocidos, apreciados y utilizados tanto en medicina tradicional como en prácticas clínicas modernas (principalmente en países asiáticos (Torreggiani *et al.*, 2023). Este hongo se encuentra ampliamente distribuido en toda la geografía global, ya que crece sobre troncos secos y árboles débiles o muertos (Tišma *et al.*, 2021). Se ha documentado que este hongo posee un potencial biorremediador especialmente en medios acuosos, principalmente con capacidad para adsorber iones metálicos de cadmio (Arica *et al.*, 2003). De esta manera, este estudio se enfoca en evaluar la tolerancia del hongo *Trametes sp.* para crecer en presencia de mercurio, y posteriormente analizar la capacidad para remover el mercurio en soluciones acuosas, utilizando la biomasa del hongo, con la finalidad de contemplar el uso promisorio de esta estructura fúngica como alternativa que asistir procesos de biorremediación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de muestras e identificación morfológica

La recolección de las muestras de cada hongo se realizó en Medellín – Antioquia (6°16'03.1"N 75°36'02.1"W), San Pablo adentro – Chocó (5°11'48.7"N 76°39'58.3"W) y Río claro– Antioquia (5°35'20.8" N 75°51'55.9" W). El muestreo se llevó a cabo bajo el permiso marco para la recolección de material biológico de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA). Los puntos de muestreo se caracterizaron por ser húmedos, de temperatura templada, y contar con estructuras que sostenían el material fúngico asociado a troncos de madera, o troncos de árbol secos, sustrato específico para su desarrollo (Tišma *et al.*, 2021). Posteriormente, se procedió a secar y guardar de manera independiente para su transporte al laboratorio de Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA). Una vez en el laboratorio, el material fúngico se almacenó a 4°C, hasta su procesamiento. El material fúngico se encuentra depositado en el cepario CEMBIO, Reg.291 - IUCMA.

Identificación morfológica macroscópica y microscópica

La identificación morfológica del carpóforo se comparó con la descripción encontrada en la literatura para el género *Trametes sp.*: cuerpo fructífero que generalmente es de forma semicircular, disposición en abanico, con una superficie porosa y de textura coriácea. Las especies de este género tienden a tener colores como blanco, beige, diferentes tonalidades de café y marrón, según el sustrato se reconocen colores vibrantes como verde o rojo por la presencia de microalgas (Tišma *et al.*, 2021). Para todos los casos, cada material fúngico se lavó y desinfectó. En primera instancia, todos los especímenes se lavaron con agua jabonosa (jabón de pH neutro) para quitar restos de tierra, luego se procedió a obtener fragmentos de carpóforos con una dimensión de 1 mm². Para la desinfección, los trozos cortados se sometieron en soluciones desinfectantes en el siguiente orden, aplicando los respectivos tiempos: alcohol al 70% (1 min), glutaraldehído al 5% (30 seg) e hipoclorito al 5% (30 seg). Al final, los trozos se sumergieron en agua destilada durante 1 min para posteriormente secarlos con toallas estériles y proseguir a sembrar en tres medios de cultivo sólido de sustrato definido: papa-zanahoria-panela (PDZPA), agar ogy (Oxoid®), y agar papa (Merck®) para observar en cuál de los tres se evidenciaba mayor crecimiento radial (Krupodorova *et al.*, 2021).

Ensayo en medio sólido con diferentes concentraciones de mercurio

La exposición al mercurio en medio sólido se realizó siguiendo la metodología de (Krupodorova *et al.*, 2021) con algunas modificaciones. Se tomó una muestra de

cada hongo de 0.5 mm de diámetro de cada medio sólido previamente incubado 15 días en agar papa. La inoculación se realizó en el medio sólido seleccionado, suplementado con diferentes concentraciones de mercurio (15 mg/L, 50mg/L, 100mg/L, 200 mg/L, 300 mg/L, 500 mg/L). Se incluyó un medio sin adición de metal, como control de crecimiento normal para cada hongo. Posterior a 15 días de exposición, se tomó la medida del crecimiento radial en caja petri. A partir de este ensayo se seleccionaron los hongos que presentaron mayor crecimiento radial durante el tiempo de exposición en las diferentes concentraciones del metal.

Preparación de inóculo y ensayo de remoción de mercurio en solución acuosa

Los hongos aislados que presentaron mayor tolerancia al mercurio en medio sólido, se utilizaron para determinar la cantidad de remoción del mercurio, a partir de un ensayo en medio líquido, descrito por (Hernández-Sáenz *et al.*, 2020), con algunas modificaciones. La producción de biomasa de cada hongo se obtuvo a partir de un cultivo previo del hongo en medio sólido (15 días de incubación, a temperatura ambiente), en el cual se realizó un raspado de conidias las cuales se suspendieron en 10 ml de agua destilada estéril con tween 80 para obtener una concentración de 3×10^6 conidias/ml. Se transfirieron 250 μ l de la suspensión de conidias al medio de cultivo líquido papa-zanahoria-panela (PDZPL) suplementado con 15 mg/L de mercurio (Hg^{2+}), se incubó en una temperatura de 37°C, a una velocidad de agitación de 150 rpm, durante 14 días (Z. Wu *et al.*, 2015). Se tuvo en cuenta un control negativo del medio sin hongo y sin metal, otro control del medio solo con hongo sin metal, y un control del medio solo con metal sin inóculo. Todos los ensayos se llevaron a cabo por triplicado.

Detección de mercurio (Hg^{2+}) en medio líquido

Posterior al tiempo de incubación, se midió la cantidad de metal removido por el hongo a partir de la técnica espectrofotométrica UV/VIS utilizando ditizona como agente de color, descrita por (Z. Wu *et al.*, 2015) con algunas modificaciones. Se elaboró una curva de calibración utilizando diferentes concentraciones de Hg^{2+} (0.2 mg/L a 1.2 mg/L), la cual se utilizó como referencia para la detección del metal en cada muestra tratada. Brevemente, se centrifugó 1 ml de la muestra acuosa que contenía Hg^{2+} , tratada y no tratada, se le adicionaron 7 ml de una solución saturada de ditizona solubilizada en el surfactante Tritón x-100 al 5%, amortiguada en un buffer de fosfato (pH 2). Posteriormente, se aforó a 10 ml con la solución surfactante, se agitó suavemente para facilitar la reacción y se midió la absorbancia por espectrofotometría UV/VIS en una longitud de onda de

502 nm. La detección de mercurio (Hg^{2+}) se interpretó mediante el cambio de color que se evidenció en cada muestra al adicionar la ditizona, ya que esta reacciona con los iones metálicos, generando un color rojizo cuando está complejada con el Hg^{2+} .

Identificación molecular

Para lograr una aproximación a la identidad del material fúngico, se llevó a cabo una identificación por métodos moleculares. El material fúngico fue entregado a un laboratorio externo, quienes realizaron la extracción de ADN, verificaron la calidad del material extraído, y posteriormente, realizaron un envío a Macrogen (Korea) para secuenciar los fragmentos que codifica para las regiones ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCCG-3') e ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') previamente reportadas por (Lucero Rincón *et al.*, 2023) y facilitar el análisis de la identidad de los hongos. Los datos de las secuencias se analizaron con la herramienta Basic Local Alignment Search Tool (BLAST). Las secuencias fueron sometidas y depositadas en el Banco de secuencias (GenBank, National Center for Biotechnology Information – NCBI).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo de la morfología de los hongos recolectados, con el fin de buscar la mayor aproximación descrita para el género de *Trametes* sp. Posteriormente, en el ensayo para determinar la capacidad de los hongos recolectados, para tolerar diferentes concentraciones de mercurio en medio sólido, se realizó un análisis ANOVA de una sola vía (nivel de confianza del 95%) para identificar el efecto en el crecimiento del hongo por cada concentración del metal en un tiempo determinado. Posteriormente, un análisis de medias (Prueba Tukey) entre los valores registrados del crecimiento micelial, permitió determinar el efecto de la concentración del metal sobre el desarrollo de cada hongo, y cual de las concentraciones del metal tuvo menor afectación sobre el desarrollo del micelio, determinando así su tolerancia. A partir de este ensayo se seleccionó el o los hongos más tolerantes para el siguiente experimento. Por último, para el ensayo de remoción del metal en medio acuoso, se utilizaron los hongos más tolerantes, se analizaron diferentes puntos en el tiempo, para determinar la cantidad de mercurio en el medio, y en el punto final, se realizó un análisis ANOVA de una sola vía (nivel de confianza del 95%), con la finalidad de determinar cuál de los hongos presentó una mayor remoción de Hg^{2+} , posterior a 14 días de exposición. Para todos los casos, el cumplimiento de los supuestos de homocedasticidad y normalidad confirmaron el análisis de los datos por pruebas paramétricas. Los datos fueron analizados con Python 3.10 (Garrote, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Recolección de muestras e identificación morfológica

Ocho hongos fueron recolectados en campo, los cuales fueron seleccionados de acuerdo con la morfología descrita y compatible con las principales características morfológicas seleccionadas por revisión teórica (ver Tabla 1), lo cual permitió agrupar los hongos de acuerdo a la forma de su cuerpo fructífero: forma semicircular o en abanico, con una superficie porosa y de textura coriácea; algunas especies pueden presentar colores brillantes como el blanco, beige, café, marrón y café claro como lo describe (Tišma *et al.*, 2021) (ver Figura 1). A nivel de laboratorio, el análisis morfológico en diferentes medios de cultivo, permitió identificar al sustrato papa - zanahoria - azúcar morena como el mejor medio donde se observó el desarrollo micelial característico del género *Trametes* descrito por (Torreggiani *et al.*, 2023), el cual se caracteriza por poseer en principio un crecimiento circular, micelio algodonoso y de color blanco a beige. Este medio permitió la obtención de los resultados ya descritos debido a la alta carga de carbohidratos, minerales, y otros nutrientes que posee, permitiendo el desarrollo de micelio algodonoso de manera más rápida y efectiva. De acuerdo con los hallazgos, los aislamientos C, D, G y H fueron seleccionados por presentar similitudes con las características descritas para el hongo del género *Trametes* sp., descritas anteriormente (ver Figura 1 y Tabla 1). En el caso del hongo H, posterior a 8 días de incubación, el micelio presentó un cambio en la coloración, con una tonalidad grisácea más pronunciada. Todos los ensayos a partir de este momento, fueron realizados con el sustrato sustrato papa - zanahoria - panela (PDZPA).

Estudios previos han determinado que los hongos pertenecientes al género *Trametes* crecen satisfactoriamente en muchos tipos de hábitats en el mundo, pero se observa una mayor proliferación de este hongo en zonas arbóreas, templadas y húmedas debido a su abundancia en todo tipo de sustratos como madera, la cual le permite un mejor crecimiento (Torreggiani *et al.*, 2023). Los lugares de muestreo, cumplieron con la característica de ser húmedos, y poseer ramas de árboles viejas, lo cual ayudaría en gran manera su proliferación (Tišma *et al.*, 2021). Los diferentes hongos fueron sometidos a claves dicotómicas para poder seleccionar los hongos que cumplieran con las características asociadas al género *Trametes*, donde se incluyó el análisis del carpóforo, el desarrollo de micelio en medio sólido *in vitro*, y también, se observaron diferentes estructuras en el microscopio (Arce-torres *et al.*, 2020). A partir de lo anterior, cuatro hongos C, D, G y H presentaron las características del género *Trametes* sp., en los cuales se logró evidenciar que su sistema hifal es trimítico, con hifas generativas hialinas y fibuladas; las hifas esqueléticas identificadas se describieron rectas, de pared gruesa, pudiéndose observar claramente las fíbulas desarrolladas, características relacionadas al género de estudio (Habtemariam, 2020).

Ensayo en medio sólido con diferentes concentraciones de mercurio

De los cuatro aislamientos expuestos en las diferentes concentraciones (desde 15 hasta 500 mg/L), ninguno desarrolló micelio en los medios suplementados con 300 mg/L y 500 mg/L de mercurio, por lo tanto, solo se analizaron los resultados obtenidos en las concentraciones 15, 50, 100 y 200 mg/L. Cabe resaltar que el aislamiento D, aunque creció, presentó mayor inhibición a medida que la cantidad de mercurio aumento en el me-

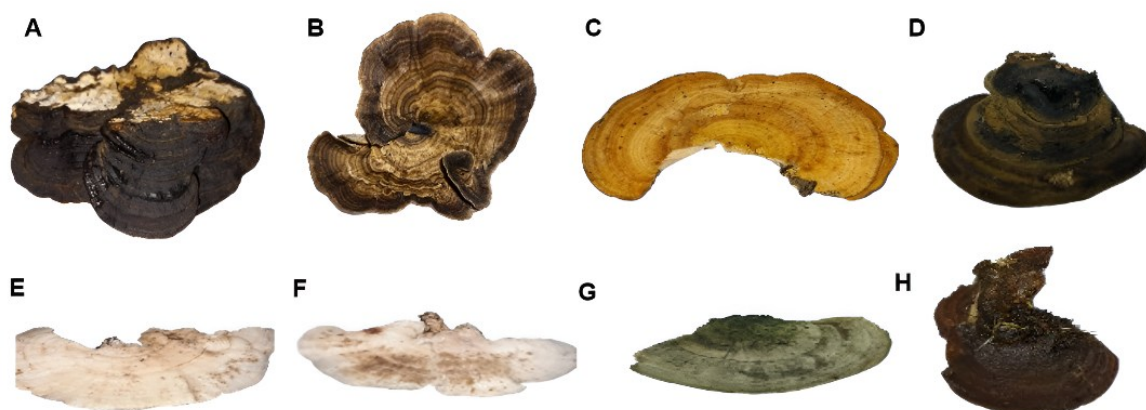


Figura 1. Representación gráfica de hongos recolectados en campo. (A, B, C y D) Colecta en Río claro- Antioquia (5° 35'20.8"N 75°51'55.9"W); (E y F) Colecta de San Pablo adentro - Chocó (5°11'48.7"N 76°39'58.3"W); (G y H) Colecta en Medellín- Antioquia (6°16'03.1"N 75°36'02.1"W). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Descripción de las características morfológicas para hongos recolectados, relacionadas a las reportadas para el género *Trametes* sp.

Características descriptivas del hongo <i>Trametes</i> sp.				
Código Hongo	Crecimiento radial	Micelio blanco y algodonoso	Esporas ovaladas y transparentes	Hifas trimíticas con presencia de fíbulas
A	-	+	-	-
B	-	-	-	-
C	+	+	+	+
D	+	+	+	+
E	+	-	-	-
F	+	-	-	-
G	+	+	+	+
H	+	+	+	+

dio, en comparación con los demás aislamientos. Se identificó una diferencia estadísticamente significativa en cada concentración del metal al que fueron expuestos los hongos, con relación al desarrollo del micelio en el medio. El análisis de diferencia de medias, por el Test de Tukey, permitió identificar que los aislamientos C, G y H fueron los que presentaron mayor tolerancia a las diferentes concentraciones del metal, los aislamientos desarrollaron micelio en todas las concentraciones, siendo la

concentración de 200 mg/L en la que se presentó mayor inhibición en el desarrollo del micelio (ver figura 2). Cabe resaltar que el desarrollo del micelio en caja de los hongos G y H, presentaron mayor abundancia y homogeneidad a medida que la concentración del metal aumento en el medio.

Adicionalmente, la prueba de Tukey (nivel de confianza del 95%), determinó que el crecimiento radial más esta-

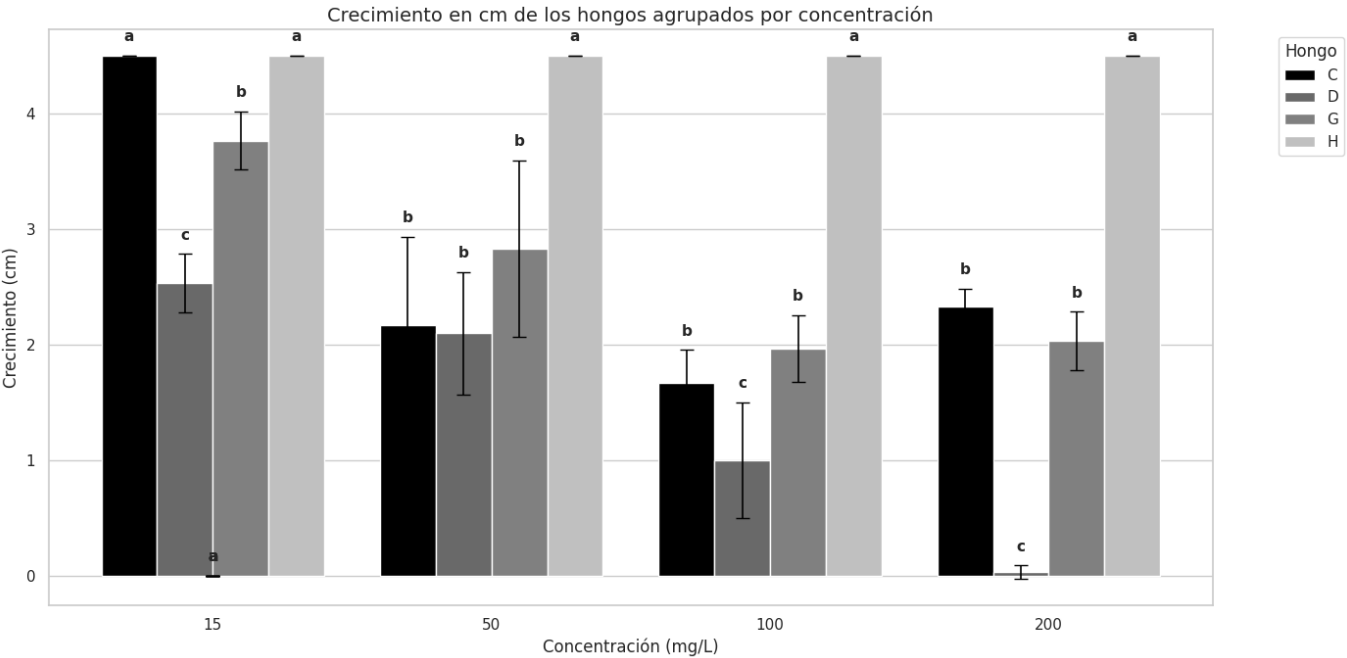


Figura 2. Comportamiento de cuatro hongos seleccionados, en medio PDZPA suplementado con diferentes concentraciones de mercurio. Las letras diferentes en cada concentración, se refieren al efecto de la concentración del metal sobre el desarrollo del micelio.

ble para todos los hongos se presentó en la concentración de 15 mg/L para todos los aislamientos, por lo tanto, el siguiente ensayo se realizó en esa concentración.

La concentración de 15 mg/L fue la que promovió el mayor desarrollo micelial. Sin embargo, en la mayoría de los hongos, a medida que la concentración del metal aumentó, el desarrollo del micelio disminuyó. Este fenómeno podría estar relacionado con la alta toxicidad del mercurio en los organismos vivos, siendo uno de los efectos más notables la peroxidación lipídica, que induce trastornos metabólicos, lo cual, a su vez, reduce la producción de biomasa y afecta negativamente al desarrollo y crecimiento micelial (Ghosh *et al.*, 2023). Además, se observó desde el inicio un desarrollo micelial ralentizado, seguido de un crecimiento normal a medida que transcurrían los días. Este comportamiento podría explicarse como un proceso de adaptación a la presencia del mercurio en el medio, lo que demuestra la capacidad de los hongos para tolerar la presencia de este metal.

Los hongos de la podredumbre blanca poseen una notable capacidad para tolerar la toxicidad de iones metálicos, incluso después de haberlos asimilado en su sistema. Esta adaptación ha sido documentada por estudios como el de Priyadarshini y colaboradores (Priyadarshini *et al.*, 2021), donde se demostró que *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum* toleraron concentraciones de 20 a 50 mg/L. Dicho estudio también reportó desarrollo

micelial en una concentración superior de 330 mg/L durante 20 días, subrayando así el potencial de este grupo de hongos. Enayatizmir y colaboradores también identificaron que hongos del género *Trametes* en concentraciones por encima de 200 mg/L de metales como Níquel (Ni) y plomo (Pb), inhiben el crecimiento de este material fúngico (Enayatizmir *et al.*, 2020).

Ensayo para el análisis de la remoción de mercurio en solución acuosa

La figura 3 muestra el comportamiento de la cantidad de metal detectada en medio líquido contaminado con mercurio (15 mg/L), tratado con los hongos G y H durante 14 días. En el caso del hongo G, se puede observar que posterior a 48 horas de exposición del hongo en el medio, se detectó una disminución media de 0.63 mg/L de mercurio. Al término del tratamiento, el medio expuesto con el hongo G, disminuyó hasta 2.40 mg/L la cantidad de mercurio en el medio, con relación a su concentración inicial. Respecto al hongo H, se puede observar que posterior a 48 horas de exposición del hongo en el medio, hubo una disminución media de 1.35 mg/L de la concentración de mercurio. Al finalizar el ensayo, se evidenció una disminución media final de 2.54 mg/L a los 14 días de tratamiento. No se observaron diferencias estadísticamente significativas en la disminución de la concentración de mercurio entre los dos hongos utilizados ($p > 0.05$), durante el tiempo final de exposición, por tanto, se identifica que ambos hongos

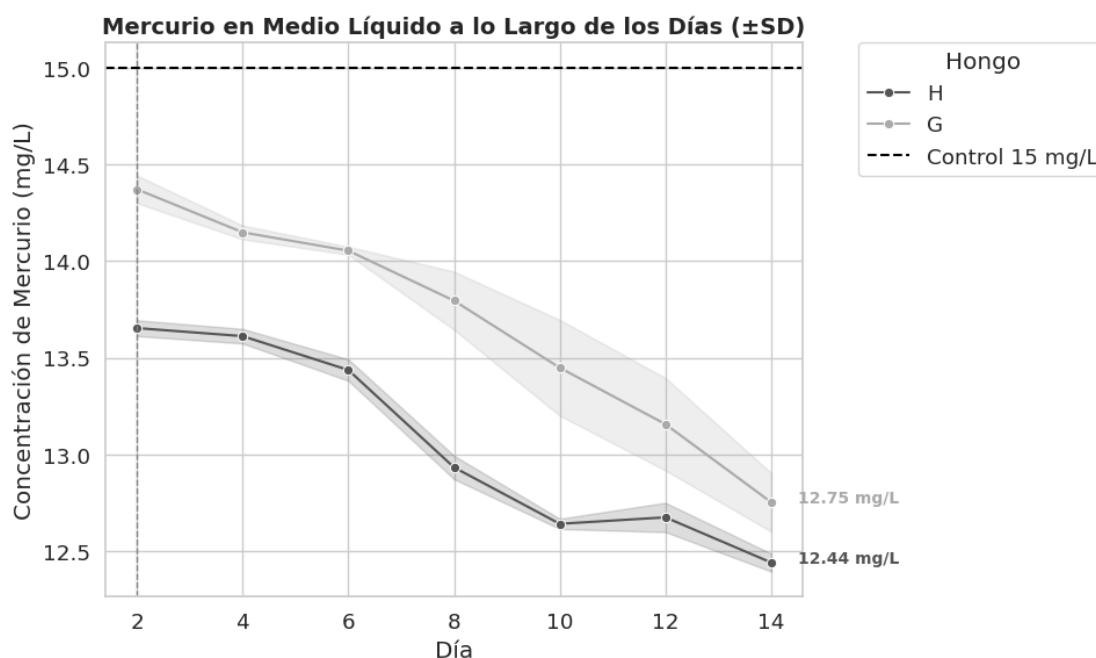


Figura 3. Comportamiento de la cantidad de mercurio en medios acuosos tratados con hongos H y G, para determinar la capacidad de remoción.

poseen la una capacidad media para remover aproximadamente un 17% el mercurio en medio acuoso. Cabe resaltar que en el medio de cultivo donde se adicionó el mercurio, sin adición de material fúngico, la cantidad del metal no se modificó durante el tiempo de incubación.

Las directrices de la OMS recomiendan una concentración máxima de Hg inorgánico de 6 µg/L en agua potable y establecen una ingesta diaria tolerable de Hg inorgánico de 2 µg/kg de peso corporal (OMS, 2017), valores que se encuentran por encima de las antes mencionadas, y se consideran tóxicos para un organismo vivo. Para el caso de los hongos, se ha evidenciado que estos tienen suficientes estrategias para sobrevivir en presencia de metales pesados, entre ellas se describen mecanismos tales como: la unión de iones metálicos a grupos funcionales de alta afinidad presentes en el hongo, acumulación de metales en la biomasa, complejación con diferentes biomoléculas microbianas y eflujo activo o exclusión de metales (Beltrán-Flores *et al.*, 2022). Por ejemplo, *Penicillium* spp. DC-F11, una cepa de hongo aislada de un área minera, mostró un potencial de biorremediación en suelos contaminados con mercurio mediante volatilización, disminuyendo este metal hasta en un 85% (Chang *et al.*, 2020).

Por otro lado, especies como *Penicillium* spp. han demostrado la capacidad de remover hasta 60 mg/L de mercurio (Hg) en medio sólido. Asimismo, se ha reportado un alto potencial de biosorción en especies como *Fusarium oxysporum*, *Sarocladium kiliense*, *Didymella glomerata*, *Phoma costaricensis* y *Cladosporium* sp., las cuales han alcanzado valores de remoción de hasta 54,9 mg/g (Văcar *et al.*, 2021).

Para el caso específico de hongos basidiomicetos, particularmente los que causan la podredumbre blanca, exhiben una notable capacidad para la remoción de metales pesados. Este proceso se atribuye principalmente a la composición proteica de su pared celular, la cual facilita que los iones metálicos se adhieran a la superficie fúngica mediante diversas uniones moleculares (L. Chen *et al.*, 2022).

Entre los mecanismos más reportados para proceso de remoción de metales, la biosorción es uno de ellos, considerado tanto mecanismo de tolerancia, como de remoción, empleado por una amplia diversidad de hongos. Particularmente, el género *Trametes* spp., perteneciente a los hongos basidiomicetos, ha sido ampliamente documentado en la literatura científica por su destacada capacidad en procesos de biorremediación. Su sistema enzimático ligninolítico, especialmente el uso de lacasas y peroxidasas, le confiere un alto potencial para la degradación de compuestos recalcitrantes y la inmoviliza-

ción o transformación de contaminantes inorgánicos, posicionándolo como un agente fúngico eficaz en la mitigación de diversos contaminantes ambientales (Beltrán-Flores *et al.*, 2022; Tišma *et al.*, 2021). Estudios reportan la remoción de hasta 400 mg/L de Cu utilizando *Trametes versicolor* (Upadhyay *et al.*, 2023). Por otro lado, la investigación de Bayramoğlu y colaboradores (Bayramoğlu *et al.*, 2003) demostró que *Trametes versicolor* posee la habilidad de remover hasta el 73% del metal respecto a la cantidad del compuesto inicial, resultado que dependió de la inmovilización del material fúngico desactivado por calor, y de esta manera se demostró la eficiencia en el proceso de biorremediación del metal. De acuerdo a estos hallazgos, se resalta que un pretratamiento de la masa fúngica, tanto si es obtener biomasa inactiva e inmovilizada, podría favorecer los tratamientos de remoción de metales en medios acuosos. Es importante resaltar que en otros estudios como los reportados por Tang y colaboradores, identificaron que, a la hora de evaluar la remoción de metales en medios acuosos, procesos como la inmovilización en perlas de carboximetilcelulosa, la inactivación por calor, entre otros (Tang *et al.*, 2024; Mathur & Gehlot, 2021), son diferentes metodologías que favorecen una mayor efectividad, en especial, para la remoción de mercurio (Hg). En este estudio, se encontró que hongos basidiomicetos, entre ellos, el género *Trametes* sp., tiene la capacidad para remover mercurio en medios acuosos, utilizando biomasa viva sin pretratamiento del micelio, logrando una remoción del 17%. Cabe resaltar que los hongos provienen de ambientes sin antecedentes de contaminación con metales pesados, razón por la cual, se evidencia un alto potencial para proyectar la actividad del hongo y optimizar su capacidad como material promisorio dentro del grupo de basidiomicetos para la biorremediación de metales pesados.

Identificación molecular

El análisis de las regiones ITS de los hongos G y H permitió establecer su identidad taxonómica. El hongo G mostró un 99,66 % de similitud con especies del género *Trametes* sp., mientras que el hongo H presentó un 99,13 % de similitud con *Endomelanconiopsis* sp. Las secuencias nucleotídicas obtenidas en este estudio fueron depositadas en el GenBank del NCBI, bajo los códigos de acceso PQ221215 y PQ252684, respectivamente.

Durante el ensayo de biorremediación, ambos aislados fúngicos demostraron una capacidad relevante para remover mercurio del medio líquido. Material fúngico asociado al género *Trametes* spp. ha sido reportado en estudios para la remoción de diferentes metales, entre ellos cadmio (Cd), plomo (Pb), Níquel (Ni), entre otros. Por ejemplo, Enayatizamir y colaboradores repor-

tan a *Trametes pubescence* con capacidad para crecer y remover Pb y Ni, tanto por mecanismos de biosorción con biomasa viva y muerta, removiendo más del 90% con biomasa seca durante 14 días de exposición (Enayatizamir et al., 2020); su estudio resalta la capacidad de los grupos funcionales intracelulares para la remoción de metales pesados, sin alterar su capacidad para la síntesis de enzimas como la lacasa. Por su parte, no se encontraron estudios donde utilicen aislamientos de *Endomelanconiosis* en procesos de biorremediación, pero si para aprovechar la producción de enzimas como las lipasas, y posterior uso para la producción de biodiesel a partir de aceites de desechos (Rodrigues et al., 2024), lo que permite identificar la capacidad metabólica de este aislamiento y su respuesta a diferentes ambientes. Para ninguno de los hongos se encontraron estudios donde analicen el comportamiento de estos en presencia de mercurio y su potencial uso en proceso de bioremediación. Estos hallazgos se alinean con reportes recientes en la literatura que evidencian la eficacia de ciertos hongos utilizados para la eliminación de compuestos mercuriales. Por ejemplo, *Metarhizium* spp. logró remover eficientemente MeHg y Hg²⁺ (0,5 mg/L) en agua dulce en tan solo 48 horas (C. Wu et al., 2022), mientras que *Mucor hiemalis* alcanzó tasas de remoción superiores al 81 % y hasta el 99 % (Ghosh et al., 2023). En este contexto, los aislamientos nativos estudiados podrían representar una alternativa biotecnológica prometedora para la remediación de ambientes contaminados con mercurio.

CONCLUSIÓN

La recolección del material biológico correspondiente a hongos basidiomicetos, permitió identificar diferencias entre ellos, los cuales presentaron una capacidad de respuesta diferente en exposición a mercurio hasta en concentraciones cercanas a 200 mg/L en medios sólidos. Un hongo identificado dentro del género *Trametes* creció en un medio acuoso contaminado con mercurio, y removió hasta el 17%, utilizando biomasa viva. Se requieren más estudios que permitan precisar el mecanismo por el cual este hongo, como biomasa viva, interactúa con el mercurio para disminuir su cantidad en medios acuosos, y definir la cantidad que puede llegar a remover en diferentes condiciones ambientales, inclusive si esta biomasa fuera pretratada. De esta manera, se establece que el hongo tiene capacidad para remover mercurio, y que este podría ser utilizado como parte del mecanismo que asiste la remoción de metales pesados, mejorar el rendimiento, por medio de su inmovilización. Este estudio aporta conocimientos iniciales para utilizar una alternativa de origen biológico en la remoción de mercurio, un metal altamente tóxico, utilizando el hongo

Trametes sp. que crece fácilmente en sustratos de bajo costo, considerando este una alternativa sustentable, amigable para el ambiente, y de alto impacto para disminuir la diseminación ambiental del metal. Se cuentan con reportes de alto valor relacionados al género *Trametes* sp., que ha sido objeto de estudio en diferentes ensayos utilizando biomasa viva o muerta en procesos asistidos para la remoción de metales pesados como el cadmio, níquel, plomo, y este estudio demuestra que el mercurio es uno más de los metales pesados que puede biorremediar.

AGRADECIMIENTOS

Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, financiador del proyecto por Convocatoria Interna 2020, Grupo de investigación Biociencias y semillero SIFACS de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, y al Programa de Estudio y Control de Enfermedades Tropicales (PECET), UdeA.

REFERENCIAS

- Arce-torres, L. F., Gómez-díaz, I., Monge-artavia, M., & Prado-cordero, J. (2020). *Metabolitos secundarios con actividad medicinal extraídos de hongos provenientes de Centroamérica Secondary metabolites with medicinal activity extracted from fungi found in Central America*. 33, 80–89.
- Arica, M. Y., Arpa, Ç., Kaya, B., Bektaş, S., Denizli, A., & Genç, Ö. (2003). Comparative biosorption of mercuric ions from aquatic systems by immobilized live and heat-inactivated *Trametes versicolor* and *Pleurotus sajor-caju*. *Bioresource Technology*, 89(2), 145–154. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00042-7)
- Bayramoğlu, G., Bektaş, S., & Arica, M. Y. (2003). Biosorption of heavy metal ions on immobilized white-rot fungus *Trametes versicolor*. *Journal of Hazardous Materials*. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00178-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00178-X)
- Beltrán-Flores, E., Pla-Ferriol, M., Martínez-Alonso, M., Gaju, N., Blánquez, P., & Sarrà, M. (2022). Fungal bioremediation of agricultural wastewater in a long-term treatment: biomass stabilization by immobilization strategy. *Journal of Hazardous Materials*, 439. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129614>
- Chang, J., Shi, Y., Si, G., Yang, Q., Dong, J., & Chen, J. (2020). The bioremediation potentials and mercury (II)-resistant mechanisms of a novel fungus *Penicillium* spp. DC-F11 isolated from contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122638>
- Chen, L., Zhang, X., Zhang, M., Zhu, Y., & Zhuo, R. (2022). Removal of heavy-metal pollutants by white rot fungi: Mechanisms, achievements, and perspectives.

- ves. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131681. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131681>
- Chen, N., Chen, S. W., Qiu, S. Y., Lu, S. M., Wei, J. R., Yang, F. W., Geng, H. C., & Zhou, M. (2023). Ganodermasides E-H, four new ergosterol derivatives from the endophytic fungus *Epicoccum poae* DJ-F associated with *Euphorbia royleana*. *Fitoterapia*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105562>
- Enayatizamir, N., Liu, J., Wang, L., Lin, X., & Fu, P. (2020). Coupling Laccase production from *Trametes pubescens* with heavy metal removal for Economic Waste Water Treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101357>
- Firincă, C., Zamfir, L. G., Constantin, M., Răut, I., Capră, L., Popa, D., Jinga, M. L., Baroi, A. M., Fierăscu, R. C., Corneli, N. O., Postolache, C., Doni, M., Gurban, A. M., Jecu, L., & Şesan, T. E. (2024). Microbial Removal of Heavy Metals from Contaminated Environments Using Metal-Resistant Indigenous Strains. *Journal of Xenobiotics*, 14(1), 51–78. <https://doi.org/10.3390/jox14010004>
- Garrote, M. F. (2020). Use of microorganisms as bioremediators of textile effluents contaminated by azo dyes. *Universidade Da Coruña*, 1–17.
- Ghosh, S., Rusyn, I., Dmytruk, O. V., Dmytruk, K. V., Onyeaka, H., Gryzenhout, M., & Gafforov, Y. (2023). Filamentous fungi for sustainable remediation of pharmaceutical compounds, heavy metal and oil hydrocarbons. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2023.1106973/FULL>
- Habtemariam, S. (2020). *Trametes versicolor* (Synn. *Coriolus versicolor*) polysaccharides in cancer therapy: Targets and efficacy. In *Biomedicines* (Vol. 8, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES8050135>
- Hernández-Sáenz, D., Puentes-Morales, C. S., Mateus-Maldonado, J. F., Pedroza-Camacho, L. D., Ramírez-Rodríguez, J., Rivera-Hoyos, C. M., & Pedroza-Rodríguez, A. M. (2020). Evaluación del consorcio entre *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor* y bacterias aeróbicas para remoción de colorantes sintéticos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(1), 45–59. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.82735>
- Krupodorova, T. A., Barshteyn, V. Y., & Sekan, A. S. (2021). Review of the basic cultivation conditions influence on the growth of basidiomycetes. *Current Research in Environmental and Applied Mycology*, 11, 494–531. <https://doi.org/10.5943/CREAM/11/1/34>
- Kumar, A., Yadav, A. N., Mondal, R., Kour, D., Subrahmanyam, G., Shabnam, A. A., Khan, S. A., Yadav, K. K., Sharma, G. K., Cabral-Pinto, M., Fagodiya, R. K., Gupta, D. K., Hota, S., & Malyan, S. K. (2021). Mycoremediation: A mechanistic understanding of contaminants alleviation from natural environment and future prospect. In *Chemosphere*, Vol. 284. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131325>
- Lizarazo, M. F., Herrera, C. D., Celis, C. A., Pombo, L. M., Teherán, A. A., Piñeros, L. G., Forero, S. P., Velandía, J. R., Díaz, F. E., Andrade, W. A., & Rodríguez, O. E. (2020). Contamination of staple crops by heavy metals in Sibaté, Colombia. *Heliyon*, 6(7). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E04212>
- Londoño, P. (2020). Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con mercurio, cadmio y plomo (Hg, Cd, Pb). In *Universidad de Córdoba, Facultad de ciencias básicas, Departamento de química, programa de química*.
- Lucero Rincón, C. H., Peña Salamanca, E. J., Cantera Kintz, J. R., Lizcano, O. V., Cruz-Quintana, Y., & Neira, R. (2023). Assessment of mercury and lead contamination using the bivalve *Anadara tuberculosa* (Arcidae) in an estuary of the Colombian Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 187. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.114519>
- Mathur, M., & Gehlot, P. (2021). Mechanistic evaluation of bioremediation properties of fungi. *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Recent Advances in Application of Fungi and Fungal Metabolites: Current Aspects*, 267–286. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821005-5.00020-X>
- Meyer, L., Guyot, S., Chalot, M., & Capelli, N. (2023). The potential of microorganisms as biomonitoring and bioremediation tools for mercury-contaminated soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115185>
- Molina, D. A. R., Vargas, J. H. L., Gutierrez, J. A. B., Gallo-Ortiz, A., & Duarte-Correa, Y. (2021). Residues of veterinary drugs and heavy metals in bovine meat from Urabá (Antioquia, Colombia), a promising step forward towards international commercialization. *Veterinary and Animal Science*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2021.100192>
- Priyadarshini, E., Priyadarshini, S. S., Cousins, B. G., & Pradhan, N. (2021). Metal-Fungus interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles. In *Chemosphere* (Vol. 274). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129976>
- Rodrigues, J. G. C., Cardoso, F. V., Duvoisin Junior, S., Machado, N. T., & Albuquerque, P. M. (2024). Endomelanconiopsis endophytica Lipase Immobilized in Calcium Alginate for Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil. *Energies*, 17(22). <https://doi.org/10.3390/en17225520>
- Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. S., & Benítez-Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio.

- Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12(1), 94–109. <https://doi.org/10.46571/JCI.2020.1.8>
- Tang, H., Xiang, G., Xiao, W., Yang, Z., & Zhao, B. (2024). Microbial mediated remediation of heavy metals toxicity: mechanisms and future prospects. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 15). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1420408>
- Tišma, M., Žnidaršič-Plazl, P., Šelo, G., Tolj, I., Šperanda, M., Bucić-Kojić, A., & Planinić, M. (2021). *Trametes versicolor* in lignocellulose-based bioeconomy: State of the art, challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 330. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124997>
- Torreggiani, A., Beccaccioli, M., Verni, M., Cecchetti, V., Minisci, A., Reverberi, M., Pontonio, E., & Rizzello, C. G. (2023). Combined use of *Trametes versicolor* extract and sourdough fermentation to extend the microbiological shelf-life of baked goods. *LWT*, 189. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.115467>
- Upadhyay, S. K., Rani, N., Kumar, V., Mythili, R., & Jain, D. (2023). A review on simultaneous heavy metal removal and organo-contaminants degradation by potential microbes: Current findings and future outlook. In *Microbiological Research* (Vol. 273). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127419>
- Văcar, C. L., Covaci, E., Chakraborty, S., Li, B., Weindorf, D. C., Frențiu, T., Părvu, M., & Podar, D. (2021). Heavy metal-resistant filamentous fungi as potential mercury bioremediators. *Journal of Fungi*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/jof7050386>
- Wu, C., Tang, D., Dai, J., Tang, X., Bao, Y., Ning, J., Zhen, Q., Song, H., St. Leger, R. J., & Fang, W. (2022). Bio-remediation of mercury-polluted soil and water by the plant symbiotic fungus *Metarhizium robertsii*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(47). <https://doi.org/10.1073/PNAS.2214513119>
- Wu, Z., Sun, M., & Zou, L. (2015). *Colorimetric Detection of Mercury in Aqueous Media Based on Reaction with Dithizone*. 111–116. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48354-2_11i