

Recibido: 08.02.2024 • Aceptado: 16.12.2024

**Palabras clave:** Hongos, metales pesados, contaminación, mecanismos de biorremediación.

# Los hongos, microorganismos que ayudan en la descontaminación de ambientes contaminados con metales pesados

DOMINGO MARTÍNEZ SOTO

*dmartinez@cicese.edu.mx*

DEPARTAMENTO DE MICROBIOLOGÍA, CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y  
DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

AMAURI PONCE HERNÁNDEZ

*amauri.ponce@uaslp.mx*

Facultad de Ciencias Químicas, UASLP

CANDY CARRANZA ÁLVAREZ

*candy.carranza@uaslp.mx*

Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca, UASLP

Los metales pesados se encuentran naturalmente en el ambiente. Sin embargo, el aumento de las actividades antropogénicas ha causado su acumulación en concentraciones tóxicas en diversos ecosistemas, ocasionando problemas de salud pública. En México, se ha reportado la presencia de estos metales en cuerpos de agua, sedimentos, suelos y aire; principalmente en zonas urbanas, industriales, ambientes costeros y marinos. La presencia de los metales en el ambiente se debe principalmente a actividades como la minería, agricultura, industria y el uso de automóviles. Para contrarrestar este problema se ha utilizado a los hongos, organismos que tienen alta capacidad de adaptación y resistencia a diferentes tipos de estrés. Este trabajo presenta una breve pero profunda revisión, sobre como los hongos ayudan a biorremediar ambientes contaminados con metales pesados.

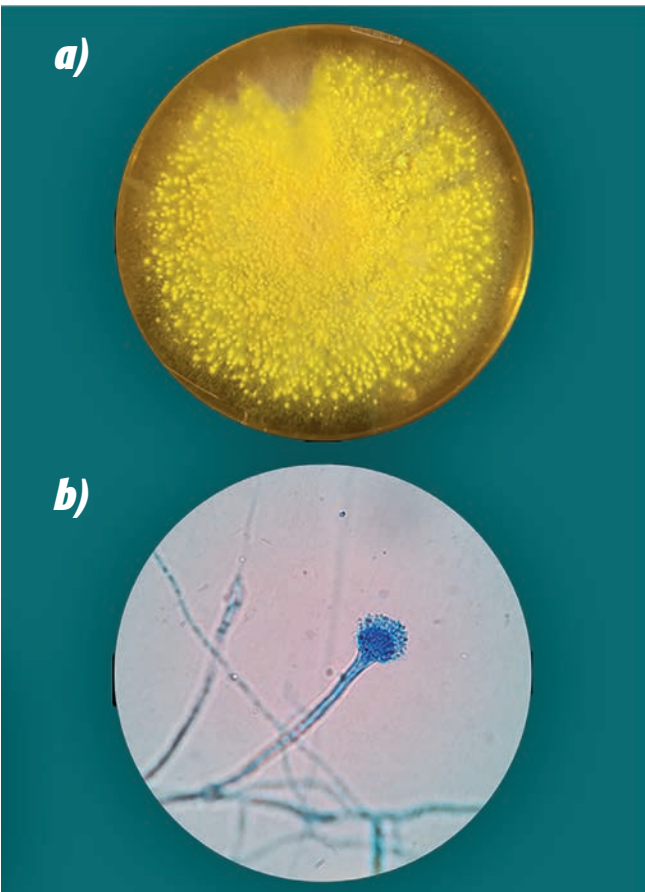


Figura 1. Características de un hongo filamentoso creciendo en concentraciones tóxicas de cadmio (Cd). a) Colonia fúngica y b) Estructura reproductiva (conidióforo) de un hongo creciendo en medio contaminado con 8 miligramos por kilogramo de Cd.

### ¿Qué son los hongos?

Los hongos son organismos eucariotas, es decir, células que presentan uno o más núcleos y organelos delimitados por membranas, los cuales cumplen funciones específicas para el funcionamiento de las células fúngicas. Estos hongos son cosmopolitas, ya que se encuentran en una amplia variedad de hábitats: en el suelo, el agua, el aire, en ambientes abiertos o cerrados, en la superficie de diferentes objetos, incluso en animales y plantas. Esto se debe a su alta capacidad de adaptación, lo que les permite resistir y sobrevivir bajo diferentes tipos de estrés, tales como la presencia de metales pesados (MP) (Figura 1), temperaturas extremas, diferentes condiciones atmosféricas, altas concentraciones de salinidad, acidez, entre otros.

La biorremediación hace referencia al uso de organismos vivos (como plantas, bacterias, hongos o algas) para restaurar sitios contaminados. En este trabajo se describe el papel de los hongos como organismos biorremediadores, resaltando su uso como una estrategia eco-amigable y económica para recuperar suelos y cuerpos de agua afectados por la contaminación con MP.

### Contaminación por metales pesados en México

El término “MP” se refiere a metales que poseen un número atómico superior a 20 y un peso mayor a 5 gramos por mililitro. Dentro de los metales pesados, existen aquellos denominados “esenciales”, como el magnesio (Mg), cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn), que son usados por los organismos vivos en diversas funciones celulares. Sin embargo, existen otros MP como el plomo (Pb), cadmio (Cd), plata (Ag), litio (Li) y bario (Ba), los cuales son denominados “no esenciales” debido a que no desempeñan una función biológica en los organismos vivos y que, incluso, son tóxicos a bajas concentraciones. Aunque los MP se encuentran naturalmente en el ambiente, el aumento de las actividades antropogénicas ha aumentado su acumulación en el ambiente ocasionando problemas de salud en humanos y en los ecosistemas.

## Actividades antropogénicas

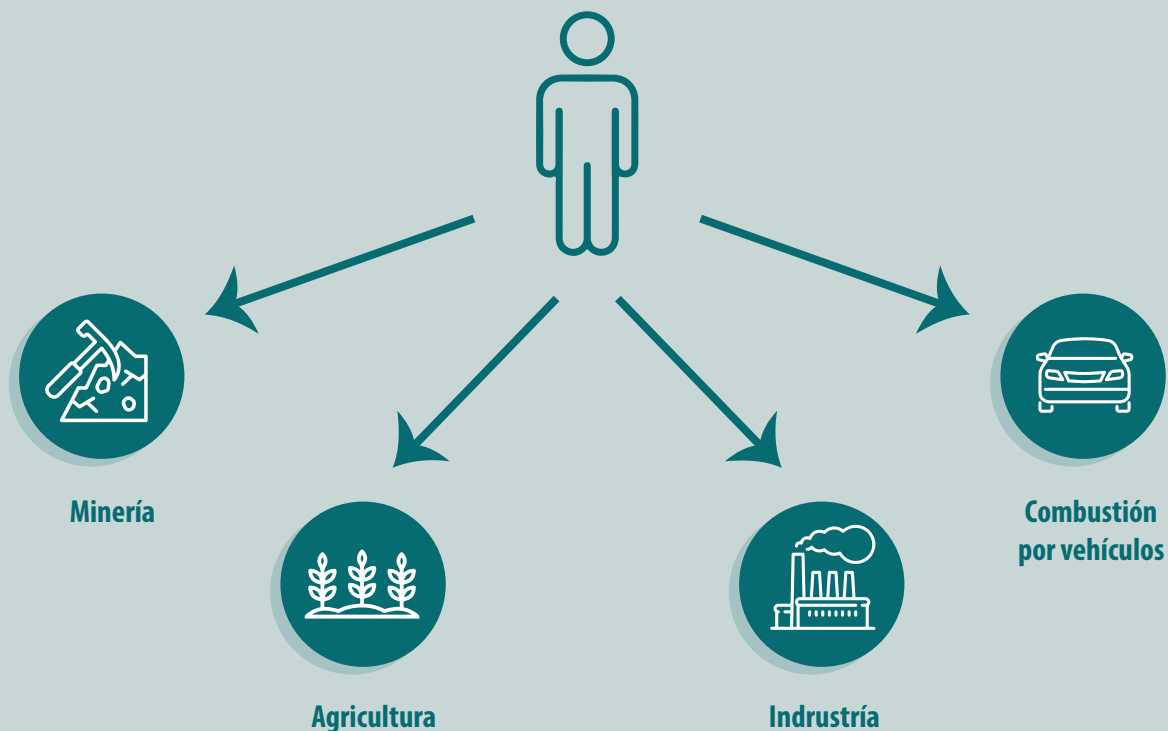


Figura 2.  
Principales actividades antropogénicas que generan contaminación por MP en México.

Las principales actividades antropogénicas que contribuyen al aumento de la contaminación por MP incluye la minería, agricultura, industria y el uso de automóviles (Figura 2). En México se ha reportado la presencia de MP en cuerpos de agua, sedimentos y suelos, principalmente en zonas urbanas, industriales, ambientes marinos y en el aire. Incluso se ha reportado la presencia de MP en vegetales y peces. Un estudio reciente realizado por Aguilera et al. (2021) demuestran la presencia de MP en el polvo de ciudades industrializadas como la Ciudad de México, encontrando cantidades importantes de Pb, Zn y Cu. Desafortunadamente, también se ha registrado contaminación por MP en cuerpos de agua en los estados de Baja California Sur, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Puebla, Quintana Roo, Tlaxcala y Zacatecas. La tabla 1 muestra los estados del país con reportes de concentraciones altas de MP en el medio ambiente.

### Los hongos limpian ambientes contaminados con metales pesados

Actualmente, existen tecnologías físicas y químicas utilizadas para eliminar MP del agua o del suelo, aunque tienen un alto costo; sin embargo, existen alternativas biológicas amigables con el medio ambiente y económicamente rentables (Figura 3). Una tecnología emergente es la microrremediación, que aprovecha la capacidad de los hongos

para absorber, acumular o metabolizar compuestos contaminantes. Por ejemplo, se ha observado que los hongos *Aspergillus terreus*, *Trichoderma viride*, *Trichoderma longibrachitum* y *Aspergillus niger* pueden absorber y eliminar Pb, Cd, cromo (Cr) y níquel (Ni) de medios líquidos (Joshi et al. 2011). Además, Dusengemungu et al. (2020) demostraron que los hongos del género *Aspergillus*, *Penicillium* y *Trichoderma* pueden absorber diversos metales. También se ha demostrado que *Fusarium* sp. puede biorremediar la contaminación por Pb, Cr, Ni y Ag, mientras que los hongos del género *Rhizopus* y *Absidia* pueden capturar Pb, Cd, Cu y Zn en su pared celular (Volesky, 1994).

Estados	Medio ambiental	Metal contaminante
Baja California Sur	Agua	Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn
	Sedimento	Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn
Estado de México	Sedimento	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn
	Suelo	Cr, Cu, Fe, Pb, V, Zn
Guerrero	Agua	Cd, Fe, Mn, Pb, Zn
	Sedimento	Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Sb, Zn
Jalisco	Suelo	Cd, Cu, Mn, Pb, Zn
	Agua	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, V, Zn
Michoacán	Sedimento	Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn
	Agua	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn
Puebla	Sedimento	Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn
	Agua	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb
Quintana Roo	Sedimento	Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn
	Agua	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn
San Luis Potosí	Suelo	Cr, Cu, Fe, Pb, Zn
	Sedimento	Cr, Cu, Fe, Pb, Sb, Zn
Zacatecas	Suelo	Cu, Fe, Pb, Zn
	Agua	Cr, Cu, Pb, Zn
	Suelo	Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V, Zn

Tabla 1. Estados de México con mayor contaminación por MP.

### Mecanismos de los hongos para la descontaminación de metales pesados

Los hongos han desarrollado mecanismos que les permiten tolerar y absorber metales, los cuales pueden ocurrir en el exterior o interior de la célula fúngica (Figura 4). En el mecanismo externo, los hongos excretan compuestos químicos, conocidos como sideróforos y/o ácidos orgánicos (por ejemplo, ácido cítrico o ácido oxálico), que inactivan a los MP y evitan su movilización en el suelo o agua. Asimismo, la estructura de la pared celular fúngica, compuesta por grupos hidroxilo (-OH), carbonilo (-C=O), amino (-NH<sub>2</sub>) y fosforilo (O=PO<sub>2</sub><sup>-</sup>) pueden atrapar e inmovilizar MP.

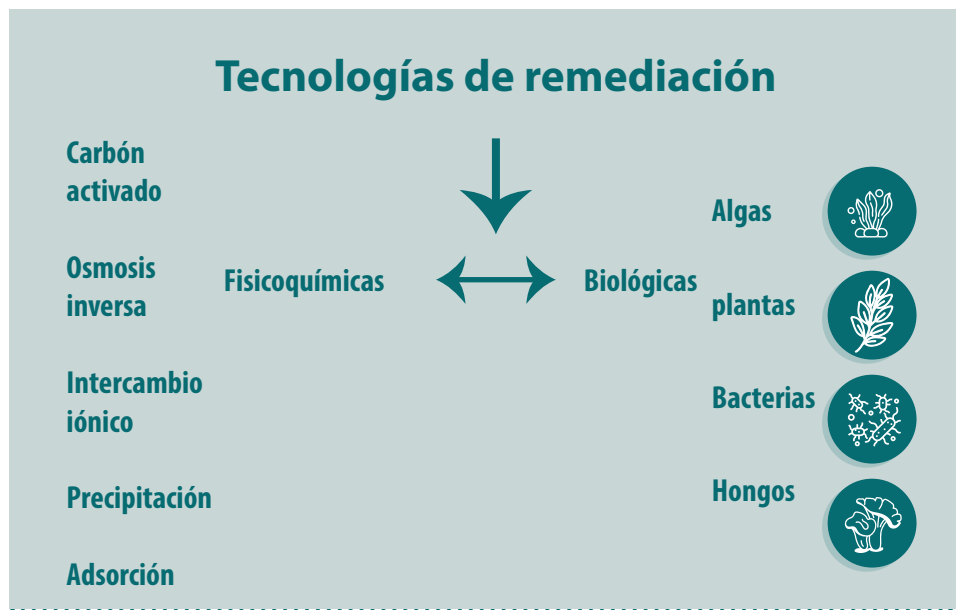


Figura 3. Principales las tecnologías empleadas para la restauración de sitios contaminados con MP.



El mecanismo interno, por su parte, ocurre una vez que los MP son internalizados en la célula. Dentro de ésta, los MP son atrapados por proteínas, como el glutatión, fitoquelatinas y metalotioneínas, que reducen la toxicidad de los metales y protegen a la célula fúngica de posibles daños. Además, los MP pueden ser internalizados en la vacuola de los hongos mediante proteínas transportadoras presentes en la membrana vacuolar. Estos transportadores promueven el paso de los MP hacia su interior, inmovilizándolos y evitando que produzcan daño a las estructuras celulares del hongo.

### Asoiación hongo-planta para la biorremediación de metales

Es bien sabido que ciertas plantas, conocidas como "hiperacumuladoras", representan una buena estrategia para restaurar sitios contaminados gracias a su capacidad para tolerar y absorber MP. Además, las relaciones simbióticas, es decir, las interacciones entre las plantas con los microorganismos presentes en la rizosfera, mejoran su capacidad para la descontaminación. En particular, la interacción de plantas hiperacumuladoras de MP con hongos tolerantes a MP podría utilizarse como una estrategia mejorada y efectiva para descontaminar el medio ambiente. En las interacciones simbióticas en-

tre hongos y plantas, ambos organismos se benefician. Por un lado, los hongos promueven un mayor crecimiento de la raíz, así como una mayor acumulación y absorción de MP en las plantas. Por otro lado, las plantas proveen un nicho y nutrientes para el desarrollo de los hongos, además de inmovilizar contaminantes en suelo, disminuyen la toxicidad, y mejoran la tolerancia de los hongos a MP. Por ejemplo, estudios realizados por Sun et al. (2017), mencionan que el hongo *Mucor circinelloides* mejora la remoción de Pb y el crecimiento en plantas de tomate. Además, se ha reportado que el hongo *Exophiala pisciphila* incrementa el

## Inmovilización intracelular de metales

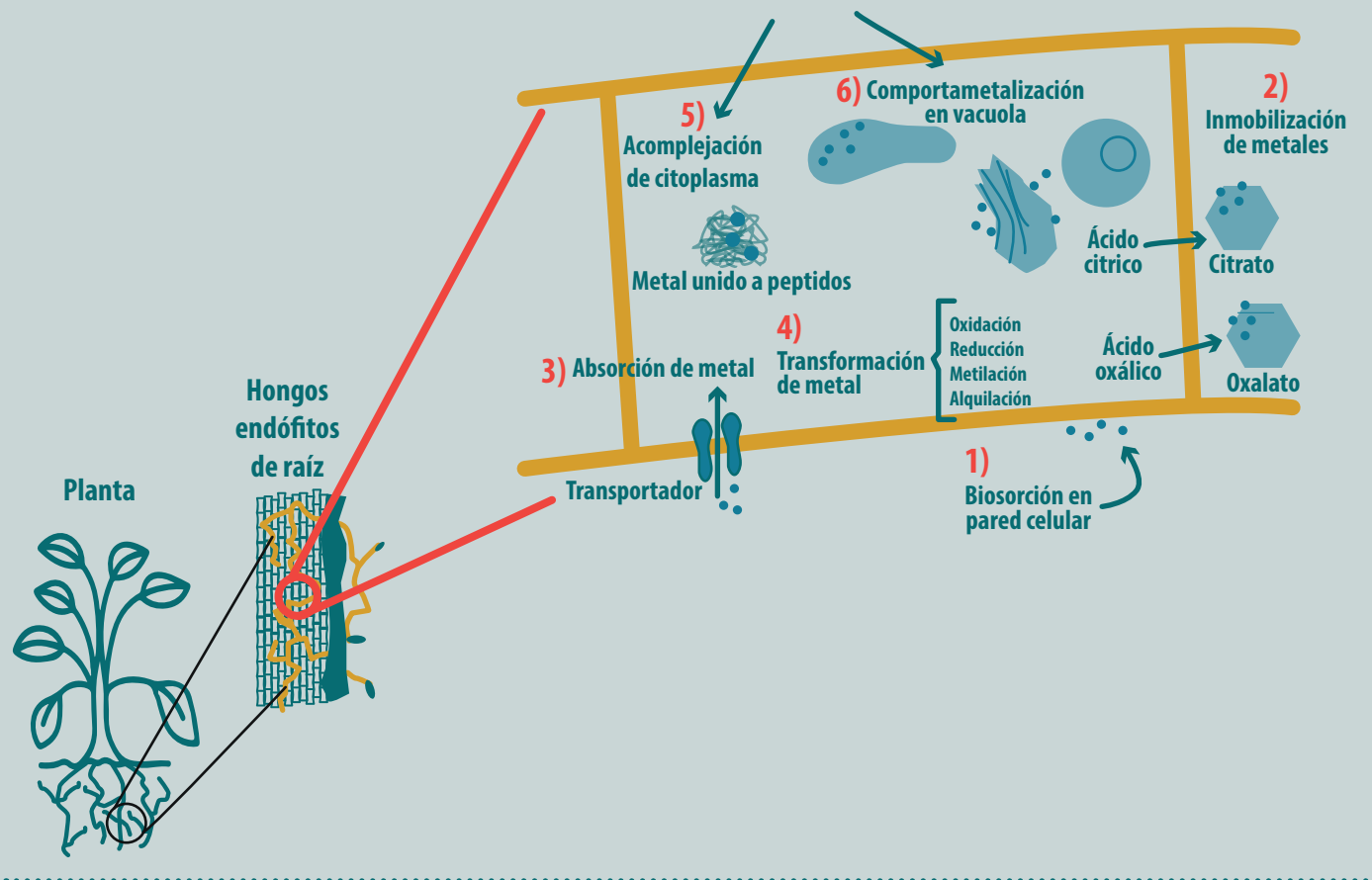


Figura 4. Mecanismos de desintoxicación empleados por los hongos para la biorremediación de MP. 1, los MP son capturados por grupos funcionales de la pared fúngica. 2, los compuestos químicos liberados por los hongos capturan a los MP y evitan su movilización. 3, los MP son absorbidos hacia el interior de la célula fúngica a través de transportadores de membrana celular. 4, los MP sufren diversas transformaciones químicas que reducen su toxicidad. 5, los MP son inactivados por proteínas producidas por la célula fúngica. 6, los MP son internalizados en la vacuola.



• **DOMINGO MARTÍNEZ SOTO**

- Bioquímico por la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Maestría y doctorado en
- Biotecnología de Plantas por el CINVESTAV, Unidad Irapuato. Investigador Postdoctoral del Department of Microbiology & Plant Pathology, University
- of California Riverside, así como del Department of Biochemistry and Molecular Biology, University of Massachusetts Amherst.
- Nivel 2 del SNI del Departamento de Microbiología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
- Actualmente trabaja en proyectos tales como la interacción hongo-planta para la biorremediación de ambientes contaminados
- con metales pesados; mecanismos que gobiernan la resistencia a fungicidas en hongos fitopatógenos y mecanismos involucrados en
- la virulencia y patogénesis de *Fusarium oxysporum* en plantas de zarzamora.

crecimiento en plantas de maíz y mejora la absorción de Cd en las raíces.

**Comentarios finales**

La alta contaminación por MP en nuestro país, junto con los riesgos a la salud que ocasionan y las proyecciones que indican un incremento de esta problemática en los próximos años, es necesario buscar estrategias económicas y amigables con la naturaleza que permitan la remoción de MP y otros contaminantes tóxicos. La evidencia científica indica que los hongos son una opción eficiente para restaurar sitios contaminados por MP, gracias a sus

de diversos mecanismos, que incluyen la adsorción y acumulación de metales. Considerando que los hongos y las plantas pueden absorber MP y que liberan sustancias que los inmovilizan, la interacción entre ambos puede considerarse como una estrategia novedosa que potencia la restauración de sitios impactados y reduce los problemas graves ocasionados por la contaminación del ambiente con MP. **UP**

**Referencias**

Aguilera, A., Bautista, F., Gutiérrez-Ruiz, M., Ceniceros-Gómez, A. E., Cejudo, R. y Goguitchaichvili, A. (2021). Heavy metal pollution of street dust in the largest city of Mexico, sources, and health risk assessment. *Environ Monit Assess.* 193 (4). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08993-4>.

Dusengemungu, L., Kasali, G., Gwanama, C., Ouma, K. O. (2020). Recent advances in biosorption of copper and cobalt by filamentous fungi. *Front Microbiol.* 11. 10.3389/fmicb.2020.582016.

Joshi, P. K., Swarup, A., Maheshwari, S., Kumar, R., Singh, N. (2011). Bioremediation of heavy metals in liquid media through fungi isolated from contaminated sources. *Indian J Microbiol.* 51(4): 482–487. <https://doi.org/10.1007/s12088-011-0110-9>.

Sun, L. Q., Cao, X., Li, M., Zhang, X., Li, X., y Cui, Z. (2017). Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. with *Mucor circinelloides*. *Environ Sci Pollut Res.* 24: 9681–9689.

Volesky, B. (1994). Advances in biosorption of metals: Selection of biomass types. *FEMS Microbiol Rev.* 14(4): 291–302.