

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*: Revisión

Trabajo de Investigación para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental

Autores:

Carlos Daniel Zafra Sánchez
Jean Pierre Flores Tique

Asesor:

Lic. Gina Marita Tito Tolentino

Lima, diciembre de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Gina Marita Tito Tolentino, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*: Revisión”** constituye la memoria que presentan los estudiantes Carlos Daniel Zafra Sánchez y Jean Pierre Flores Tique para obtener el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 23 días del mes de diciembre del año 2020.



Lic. Gina Marita Tito Tolentino

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a 23 día(s) del mes de diciembre del año 2020 siendo las 09:20 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

... Mg. Iliana Del Carmen Gutierrez Rodríguez , el (la) secretario(a): ... Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas
 y los demás miembros: Mg. Jackson Edgardo Perez Carpio
 y el (la) asesor(a)

..... con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de Rhizopus sp. y Rhodobacter sphaeroides: Revisión

..... de los (las) candidato (as): a) Carlos Daniel Zafrá Sánchez
 b) Jean Pierre Flores Tique
 c)

..... conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en:
 Ingeniería Ambiental
 (Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): Carlos Daniel Zafrá Sánchez

| CALIFICACIÓN | ESCALAS | | | Mérito |
|--------------|-----------|---------|-------------|---------------|
| | Vigesimal | Literal | Cualitativa | |
| | 18 | A- | Muy Bueno | Sobresaliente |

Candidato/a (b): Jean Pierre Flores Tique

| CALIFICACIÓN | ESCALAS | | | Mérito |
|--------------|-----------|---------|-------------|---------------|
| | Vigesimal | Literal | Cualitativa | |
| | 18 | A- | Muy Bueno | Sobresaliente |

Candidato/a (c):

| CALIFICACIÓN | ESCALAS | | | Mérito |
|--------------|-----------|---------|-------------|--------|
| | Vigesimal | Literal | Cualitativa | |
| | | | | |

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente/a



Asesor/a



Candidato/a (a)



 Secretario/a

 Miembro



Candidato/a (b)

 Miembro

 Candidato/a (c)

Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*: Revisión

Flores Tique, Jean Pierre; Zafra Sánchez, Carlos Daniel

Universidad Peruana Unión (UPeU) Ingeniería Ambiental Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Resumen:

El cadmio es un elemento de amplio uso en procesos industriales como el revestimiento de metales y la fabricación de baterías. Además el cadmio es uno de los elementos más tóxicos para humanos, animales y plantas, siendo uno de los contaminantes con larga persistencia en el medio. Con el fin de lidiar con la contaminación, existe una serie de técnicas de remediación utilizadas actualmente; dentro de estas la biorremediación que es una alternativa rentable que no demanda de un presupuesto elevado. La biorremediación surge como una técnica favorable para el ambiente, dado que no es necesario el uso de productos químicos que contrarresten la concentración del cadmio; lo más importante, al intervenir distintas clases de microorganismos que componen el suelo donde incluso ciertos microorganismos tienen la capacidad de descontaminar y generar procesos de adsorción del cadmio. El objetivo de esta revisión es evaluar la biorremediación de un suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de los microorganismos *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*. Se llevó a cabo la revisión de literatura en 40 artículos que fueron analizados según los criterios de búsqueda como inserción de palabras clave en diferentes bases de datos y portales académicos. Los resultados confirman que el *Rhizopus sp.* sirve como herramienta biotecnológica para la limpieza de suelos, y el *Rhodobacter sphaeroides* es importante como agente inmovilizante de cadmio por medio de la creación de sulfuros. Se concluye que los microorganismos investigados favorecen en la remediación del suelo contaminado con cadmio a través de sus capacidades metabólicas.

Palabras clave: Biorremediación, *Rhizopus sp.*, *Rhodobacter sphaeroides*, cadmio, suelo

Abstract

Cadmium is an element widely used in industrial processes such as metal plating and battery manufacturing. Furthermore, cadmium is one of the most toxic elements for humans, animals and plants, being one of the pollutants with long persistence in the environment. In order to deal with contamination, there are a number of remediation techniques currently used; within these, bioremediation, which is a profitable alternative that does not require a high budget. Bioremediation emerges as a favorable technique for the environment, since it is not necessary to use chemical products that counteract the concentration of cadmium; most importantly, when different classes of microorganisms that make up the soil intervene, where even certain microorganisms have the ability to decontaminate and generate cadmium adsorption processes. The objective of this review is to evaluate the bioremediation of a soil contaminated with cadmium through the application of the microorganisms *Rhizopus sp.* and *Rhodobacter sphaeroides*. A literature review was carried out in 40 articles that were analyzed according to the search criteria such as the insertion of keywords in different databases and academic portals. The results confirm that *Rhizopus sp.* It serves as a biotechnological tool for soil cleaning, and *Rhodobacter sphaeroides* is important as an immobilizing agent for cadmium by creating sulfides. It is concluded that the investigated microorganisms favor the remediation of cadmium-contaminated soil through their metabolic capacities.

Keywords: Bioremediation, *Rhizopus sp.*, *Rhodobacter sphaeroides*, cadmium, soil

Introducción

El acelerado desarrollo industrial, ha generado impactos ambientales por la presencia de metales pesados, provocando un desequilibrio y deterioro en la calidad del suelo (García, 2007). El cadmio es un metal pesado tóxico para humanos, animales y plantas (Saluja & Sharma, 2013). Por ello, se busca brindar atención a la remediación de áreas donde existe presencia de cadmio que, al unirse fuertemente a la materia orgánica del suelo, provoca la absorción por las plantas e incorporación a la cadena trófica; además, la fijación del metal pesado es superior en suelos que contienen, textura fina, capacidad de intercambio catiónico y mayor cantidad de materia orgánica (Sánchez, 2016). Debido a esta alta capacidad de fijación del cadmio, Liu et al., (2018) mencionan que existen técnicas de remediación sobre suelos contaminados que son clasificadas en física, química, eléctrica, térmica y biológica; siendo a su vez la fitorremediación y biorremediación como parte de la técnica biológica.

Desde el punto de vista biológico, Hou et al., (2020) afirman que la biorremediación tiende a ser más sostenible que las técnicas térmicas o fisicoquímicas tradicionales. Además, Hassan et al., (2019) dan a conocer que la biorremediación implica el uso de microorganismos que se adaptan a su microambiente, inmovilizando al metal pesado en el suelo. Esta biotecnología se presenta como favorable para el medio ambiente, debido a que intervienen distintas clases de microorganismos que componen el suelo, donde ciertos microorganismos tienen una capacidad especial para descontaminar zonas con presencia de contaminantes. Los microorganismos del suelo responden al estrés ambiental de diferentes maneras, unos se adaptan, otros quedan inactivos o mueren dependiendo de sus estados genéticos y fisiológicos, estos microbios deben tener mecanismos de aclimatación fisiológica para sobrevivir y permanecer activos frente al estrés (Schimel, Balsler, Wallenstein, 2007)

Dentro de los microorganismos eficaces para actuar frente el cadmio se encuentra el *Rhodobacter sphaeroides*, considerado como bacteria fototrófica que tiene importante actividad como agente inmovilizador por medio de la creación de sulfuros usado para la fijación del cadmio en su organismo (Peng et al., 2018). Por otro lado, Karimi et al., (2011) proponen el uso de hongos endofíticos micorrízicos arbusculares (HMA), que aparecen y viven en las raíces de la mayoría de las plantas terrestres, que a su vez son un factor positivo y determinante en el secuestro del cadmio.

En esta solución ambiental Yang et al., (2016) considera la tecnología de biorremediación como una alternativa económica a comparación de los tratamientos convencionales siendo costosos y ambientalmente destructivos. Por ello, la presente revisión tiene por objetivo evaluar la biorremediación de un suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*.

Desarrollo

Criterios de inclusión para la revisión

Para el presente estudio, se realizó una revisión literaria a fin de asegurar un marco referencial de la investigación. A partir se llevó a cabo búsquedas bibliográficas en Science Direct, Nature, Scielo, Open Access, Redalyc, Taylor & Francis, Google Scholar y Doaj, utilizando los descriptores: biorremediación, cadmio, suelo, metales pesados. Los registros obtenidos fueron entre 20 a 25 registros tras la combinación de las diferentes palabras claves.

El Cadmio, un elemento potencial nocivo

El cadmio (Cd) es un metal pesado tóxico y ha sido clasificado como el número 7 entre las 20 toxinas más importantes (Saluja & Sharma, 2013). Este metal no se encuentra en la naturaleza en estado libre, sino que se asocia por afinidad química a otros metales como el zinc, el plomo, el cobre o elementos como el oxígeno (óxido de cadmio), el cloro (cloruro de cadmio) o el sulfuro (sulfato o sulfuro de cadmio) (Minaya, 2014).

El cadmio puede acumularse en las plantas y en la fauna edáfica o animales superiores a través de aguas contaminadas mediante la red trófica (Isaura, 2011). El cadmio puede alterar la absorción de minerales por las plantas a través de sus efectos sobre la disponibilidad de minerales del suelo, o mediante la reducción de la población de microbios del suelo (Moreno et al., 1999). El Cd es de particular interés porque se encuentra en relativa abundancia en fertilizantes; la adición de residuos o fertilizantes conteniendo alta concentración del metal a tierras agrícolas, puede ocasionar importantes incrementos en la absorción de Cd por los cultivos (Grant et al., 1999).

El cadmio produce una variedad de efectos nocivos en las moléculas celulares, principalmente al causar un desequilibrio oxidante-antioxidante, una vez ingresado al cuerpo del ser humano tendrá implicancia en la patogénesis de muchos tipos de cáncer, enfermedad de itai-itai, infarto de miocardio, enfermedad arterial periférica, hipertensión y nefropatía diabética (Ghosh & Indra, 2018).

Ramírez, (2013) Uno de los mayores agentes tóxicos asociado a contaminación ambiental e industrial es el cadmio, pues reúne cuatro de las características más temidas de un tóxico:

1. Efectos adversos para el hombre y el medio ambiente.
2. Bioacumulación.
3. Persistencia en el medio ambiente.
4. Viaja grandes distancias con el viento y en los cursos de agua

Contaminación de suelo por cadmio

Generalmente, el cadmio al intervenir en el suelo con otros metales como el zinc, plomo o cobre producen una alteración inmediata y al no poder ser biodegradados (eliminación) por un suceso natural perduran en el medio por largos periodos de tiempo, que de ser así impiden el adecuado rendimiento de los productos agrícolas, calidad de la salud humana y el ecosistema (Inkham et al., 2019).

Una vez incorporado el cadmio en el suelo se produce la solubilización, que da lugar a una serie de reacciones que permiten modificar el estado en el que se encuentra el cadmio, convirtiéndose en forma menos soluble que permiten su retención en el suelo; la movilidad depende de la forma química que este metal adopte, variando en función del pH y la presencia de cationes y aniones orgánicos e inorgánicos que estén presentes en el suelo (Cullen y Maldonado, 2013). Además, Inkham et al., (2019) indican que las características del suelo correlacionadas positivamente con la retención de cadmio fueron pH, materia orgánica, contenido de arcilla, capacidad de intercambio catiónico (CIC), área de superficie específica y condiciones redox.

La interacción del cadmio con el suelo produce valores normales de concentración que se mantienen en un intervalo de 0,001 a 0,5 mg/kg donde no presentan un poder toxicológico elevado, mientras que los valores de 300-400 µg/L determinan el alto grado de contaminación en el suelo (Ortiz, 2017). Cuando el cadmio asume valores altos, es inmovilizado por medio de factores de precipitación, complejación y adsorción (Inkham et al., 2019).

Alteración del sistema radicular de la planta por el cadmio

El cadmio ingresa al tejido vegetal a nivel molecular mediante los sistemas de raíces de plantas que absorberán el metal, ingresando posteriormente de las raíces a los brotes y las hojas, y finalmente a los frutos o semillas; otra vía de ingreso a las plantas es desde la atmósfera a través de la transferencia foliar (Hou et al., 2020).

La exposición al cadmio induce mecanismos de defensa en la planta, la cual reduce su tasa metabólica basal y la actividad de las enzimas del ciclo de Krebs; los efectos tóxicos del cadmio se manifiestan por el estrés oxidativo, que aumenta la peroxidación lipídica y la producción de especies reactivas de oxígeno y peróxido de hidrógeno en las raíces y las hojas (Zaborowska, Wyszowska, & Kucharski, 2015).

Biorremediación de suelo contaminado por cadmio

Liu et al., (2018) mencionan que existen técnicas de remediación in situ y ex situ para contener, limpiar o restaurar suelos con presencia de metales pesados, los cuales varían significativamente en efectividad y costo, ver la **Figura 1**.

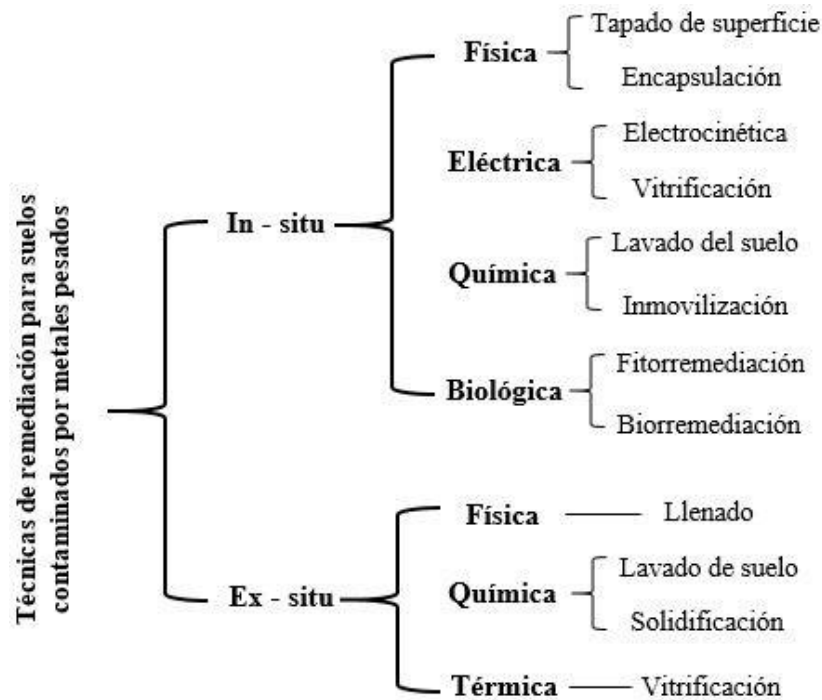


Figura 1. Técnicas comunes de remediación para suelos contaminados con metales pesados (Liu et al., 2018).

Quintella, Mata, Lima, (2019) mencionan que la biorremediación comprende el uso de microorganismos como tratamiento para contrarrestar los efectos negativos del metal que se ha situado en el suelo, como también, las enzimas o plantas asociadas a los microorganismos pueden enriquecer y agilizar el proceso de biorremediación. Asimismo, Nieves et al., (2019) corrobora que es un método que aplica agentes biológicos para la eliminación parcial o total de contaminantes y/o sustancias tóxicas del medio ambiente.

La biorremediación es una de las técnicas más confiables, desde un enfoque ecológico utiliza la capacidad natural de los microbios como lo muestra la **Figura 2.** y plantas para eliminar o neutralizar los contaminantes presentes en el medio ambiente. Los microorganismos son aceptables, principalmente por las enzimas que producen, derivado en el ataque hacia los contaminantes y degradación completa, lo cual los hará productos menos nocivos (Saluja & Sharma, 2013).

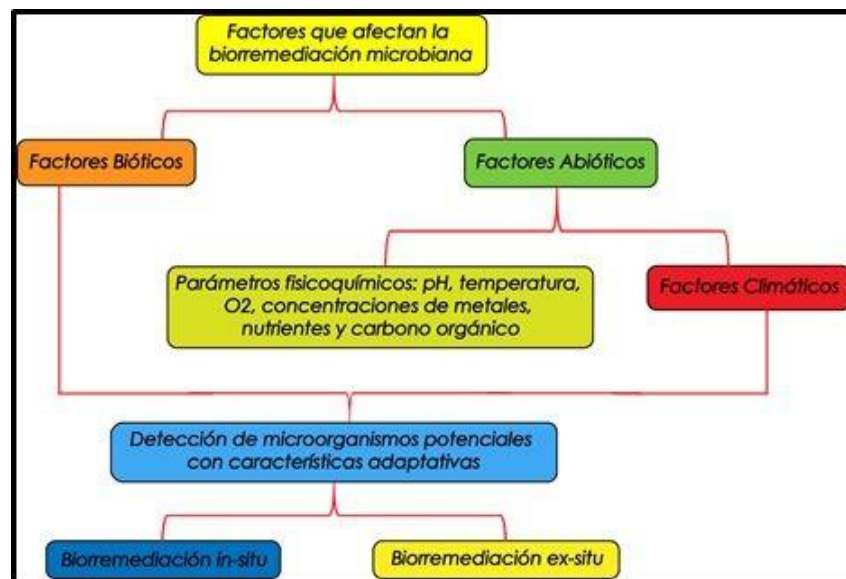


Figura 2. Retos que afrontan los microorganismos en el proceso de biorremediación (Mary et al., 2018).

Panwichian & Kantachote, (2009) destacan que los metales pesados, entre ellos, el cadmio, influyen en los microorganismos al afectar perjudicialmente su crecimiento, morfología y actividades bioquímicas, lo que resulta en una disminución de la biomasa y la diversidad.

Existen bacterias, hongos y algas que son los utilizados para la acumulación de cadmio, que se mencionan en la Tabla 1 (Yin et al., 2019).

Tabla 1. Remoción de metales pesados por medio de microorganismos

| | Microorganismos | Metales objetivo | pH óptimo | Capacidad (mg/g) | Regeneración | Referencia |
|-----------|-----------------------|------------------|-----------|------------------|--------------|--|
| Bacterias | Pseudomona aeruginosa | Cd(II) | 6.0 | 16.9 | N | (Limcharoensuk et al., 2015) |
| | Bacillus cereus | Cd(II) | 5.0 | 31.9 | Y | (Huang et al., 2013) |
| | Ochrobactrum sp. | Cd(II) | 6.0 | 83.3 | Y | (Khadivinia et al., 2014) |
| Hongos | Trichoderma | Cd(II) | 6.0 | 21.7 | N | (Bazrafshan, Zarei, & Mostafapour, 2016) |
| | Aspergillus niger | Cd(II) | 5.5 | 11 | N | (Tsekova et al., 2010) |

Fuente: (Yin, Wang, Lv, & Chen, 2019)

Verma & Kuila, (2019) afirman que la biorremediación es un proceso rentable que en lo económico no demanda de un presupuesto elevado, a pesar de ser fundamental para evitar y mitigar efectos nocivos producto de la contaminación que alteran el suelo mediante compuestos tóxicos.

Rhizopus sp.

Este hongo sirve como herramienta biotecnológica para la limpieza o descontaminación de suelos con cadmio debido a su estructura que está constituida por arbuscúlos, vesículas e hifas, que son esenciales y óptimas para reducir el metal, Cd, Pb o Zn, véase **Figura 3**.

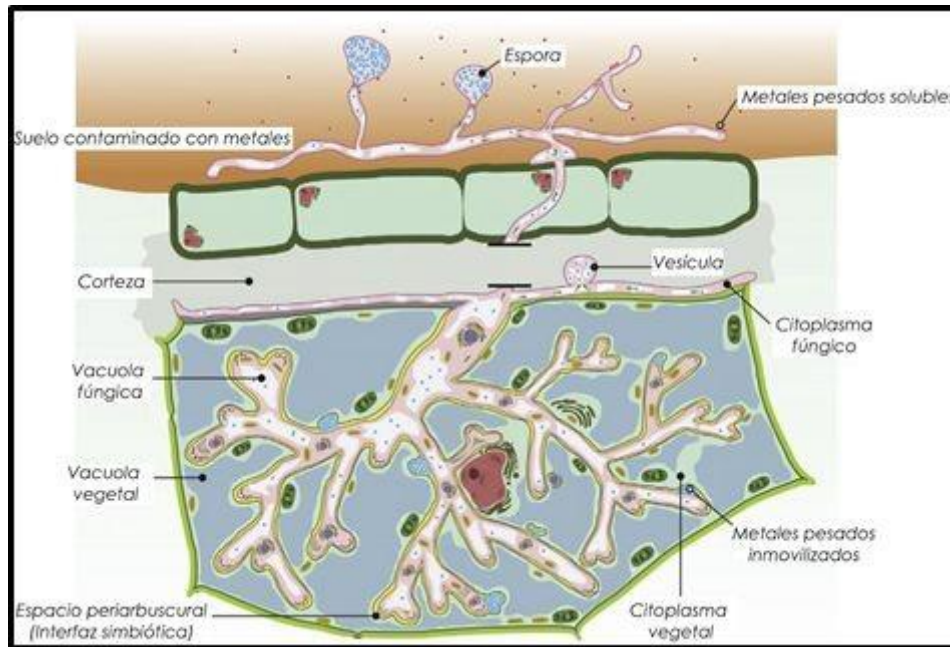


Figure 3. Estructura de AMF y almacenamiento de metales pesados que evitan la translocación a tejidos vegetales (Carrenho, Alves, & Santos, 2018).

Sin embargo, los hongos, especialmente el *Rhizopus sp.* produce una glicoproteína llamada glomalina, que establece enlaces con moléculas de alta toxicidad, a pesar de la cantidad que se produce solo puede inmovilizar < 1% del Cd total presente en la solución del suelo, a pesar de lo mencionado es eficaz para retener cualquier elemento con carga negativa (Molina, 2017).

El *Rhizopus sp.* es un tipo de hongo que presenta características de tolerancia y supervivencia en medios tóxicos tales como cadmio, cobre, plomo, arsénico y hierro (Oladipo et al. 2018). Este hongo tiene ventajas como el crecimiento rápido, no requiere de un medio altamente nutritivo, sobrevive en diferentes hábitats y crecen en diferentes condiciones climáticas (Singh et al. 2020).

Rhodobacter sphaeroides

Es una bacteria fototrófica gramnegativa, que tiene características que señalan su adaptación a condiciones en presencia de cadmio; además posee una pigmentación morada intensa y su organismo no necesita de azufre; en función a su importante actividad que realiza como agente inmovilizador por medio de la creación de sulfuros agenciada de su baja solubilidad es usada para remediación ambiental tal como lo presenta la **Figura 4** (Peng et al., 2018).

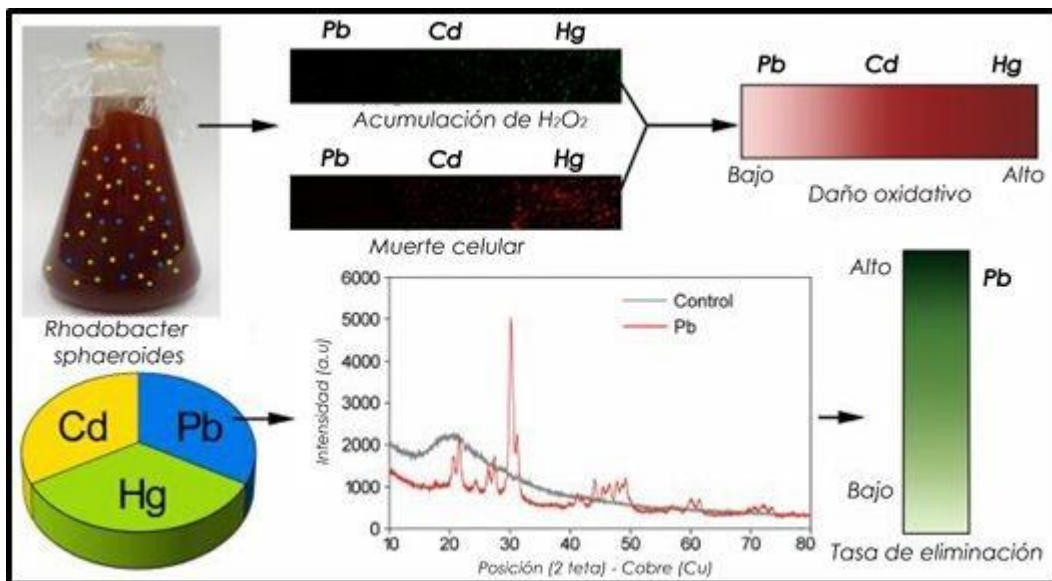


Figura 4. Eliminación y disminución del impacto por la acción del *Rhodobacter sphaeroides* sobre el suelo (Peng et al., 2018).

Este organismo microscópico puede ser encontrado en ambientes frescos y marinos, como aguas residuales y lodos activados, por otro lado, metabólicamente son los más versátiles de todos los procariontes; la bacteria *Rhodobacter sphaeroides* puede usar una amplia gama de compuestos orgánicos como fuentes de carbono y energía (Kim et al., 2004). El proceso de hidrógeno biológico anaeróbico, señala que cuando el *Rhodobacter sphaeroides* inicia el proceso de crecimiento, y sobre el suelo hay cadmio en concentraciones considerables, los iones de este elemento pueden ser eliminados por precipitación y biosorción, asimismo, gran parte podrá hallarse retenida en la pared celular de la bacteria (Yang et al., 2016).

Las células de *Rhodobacter sphaeroides* son ricas en bioquímicos y no secretan tóxicos o sustancias nocivas; además, tiene buena tolerancia y actúa en efectos de degradación de plaguicidas, herbicidas y otros productos químicos tóxicos (Wu et al., 2018).

En los estudios de fraccionamiento subcelular del *Rhodobacter sphaeroides* revelan que casi el 90,5% del cadmio, absorbido por las células, se encuentra en la pared celular, mientras que la presencia de cadmio en la fracción citoplásmica y en la membrana son solo el 3,7% y el 5,8% de la absorción total; la eliminación y transformación del ión cadmio se realiza principalmente en la pared celular (Bai, Zhang, Yang, & Li, 2008).

Conclusión

La revisión bibliográfica acerca de la biorremediación de un suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides* nos permitió concluir que los microorganismos adoptan la capacidad de mejorar la eficiencia de la biorremediación en suelos contaminados mediante la absorción del cadmio en su capacidad metabólica, es por ello que el cadmio sigue siendo un elemento frecuente generado por las actividades industriales, por ende, su presencia, altera y deteriora la calidad del suelo. La técnica de biorremediación es una solución que se halla en la naturaleza frente a la contaminación por cadmio, donde el uso de microorganismos tiene un alto potencial al contar con amplias capacidades metabólicas; a partir de la investigación es necesario evaluar estudios complementarios que permitan conocer el comportamiento entre microorganismo – suelo.

Referencias

- Bai, H. J., Zhang, Z. M., Yang, G. E., & Li, B. Z. (2008). Bioremediation of cadmium by growing *Rhodobacter sphaeroides*: Kinetic characteristic and mechanism studies. *Bioresource Technology*, 99(16), 7716–7722. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.071>
- Bazrafshan, E., Zarei, A. A., & Mostafapour, F. K. (2016). Biosorption of cadmium from aqueous solutions by *Trichoderma* fungus: kinetic, thermodynamic, and equilibrium study. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14598–14608. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1065764>
- Carrenho, R., Alves, L. D. J., & Santos, S. (2018). Chapter 15 - Arbuscular Mycorrhizal Fungi, interactions with heavy metals and rehabilitation of abandoned mine lands. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00015-47>
- Cullen, J.; Maldonado, T. (2013). Cadmium: from toxicity to essentiality, metal ions in life sciences, vol. 11. Springer Science and Business Media, 2013.
- García, L. (2007). Capacidad remediadora y bioacumuladora de los órganos de *Helianthus annuus* L. “girasol” cuando son sometidas a diferentes concentraciones de plomo. Universidad Nacional de Trujillo.
- Grant, C.A.; L.D. Bailey; M.J. McLaughlin & B.R. Singh. 1999. Managements factors which influence cadmium concentrations in crops. Pp 151-198. In: McLaughlin M.J. and B.R. Singh (eds.) *Cadmium in soils and plants*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Netherlands.
- Ghosh, K., & Indra, N. (2018). Cadmium treatment induces echinocytosis, DNA damage, inflammation, and apoptosis in cardiac tissue of albino Wistar rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 59, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.02.009>
- Hou, D., O’Connor, D., Igalavithana, A.D. *et al.* Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat Rev Earth Environ* 1, 366–381 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
- Huang, F., Dang, Z., Guo, C. L., Lu, G. N., Gu, R. R., Liu, H. J., & Zhang, H. (2013). Biosorption of Cd(II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 107, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.062>

- Hassan, A., Pariatamby, A., Ahmed, A., & Auta, H. S. (2019). Enhanced Bioremediation of Heavy Metal Contaminated Landfill Soil Using Filamentous Fungi Consortia: A Demonstration of Bioaugmentation Potential, 1–20.
- Isaura, J.-A. (2011). Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid. Universidad Complutense de Madrid.
- Inkham, R., Kijjanapanich, V., Huttagosol, P., & Kijjanapanich, P. (2019). Low-cost alkaline substances for the chemical stabilization of cadmium-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109395>
- Karimi, A., Khodaverdiloo, H., Sepehri, M., & Rasouli, M. (2011). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal contaminated soils. *African Journal of Microbiology Research*, 5(13) (2014), 1571–1576. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.465>
- Khadivinia, E., Sharafi, H., Hadi, F., Zahiri, H. S., Modiri, S., Tohidi, A., ... Noghabi, K. A. (2014). Cadmium biosorption by a glyphosate-degrading bacterium, a novel biosorbent isolated from pesticide-contaminated agricultural soils. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6), 4304–4310. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.037>
- Kim, M.K., Choi, K.M., Yin, C.R., 2004. Odorous swine wastewater treatment by purple non-sulfur bacteria, *Rhodospseudomonas palustris*, isolated from eutrophicated ponds. *Biotechnol. Lett.* 26, 819–822.
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Limcharoensuk, T., Sooksawat, N., Sumarnrote, A., Awutpet, T., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Auesukaree, C. (2015). Bioaccumulation and biosorption of Cd²⁺ and Zn²⁺ by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.013>
- Moreno JL, Hernández T, García C (1999). Efectos de un compost de lodos de depuradora que contiene cadmio sobre la dinámica de la materia orgánica y la actividad microbiana en suelos áridos. *Biol. Fert. Suelos* 28: 230-237.

- Molina, D. M. J. (2017). Efecto de la inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero, 2–107.
- Minaya Villarreal, Johann A. (2014). Importancia de los minerales en la tecnología e industria y su impacto ambiental.
- Mary, J., Karthik, C., Ganesh, R., Kumar, S. S., Prabakar, D., Kadirvelu, K., & Pugazhendhi, A. (2018). Biological approaches to tackle heavy metal pollution: A survey of literature. *Journal of Environmental Management*, 217, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.077>
- Nieves, Y., Parra, N., Villanueva, S., & Henríquez, M. (2019). Tech note: bioremediation, enemy of cadmium. *Revista Ingeniería*, 26, 96–104.
- Oladipo O. G., Awotoye O. O., Olayinka A., Bezuidenhout C. C., Maboeta M. S. 2018. Heavy metal tolerance traits of filamentous fungi isolated from gold and gemstone mining sites. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.06.003>
- Peng, W., Li, X., Song, J., Jiang, W., Liu, Y., & Fan, W. (2018). Bioremediation of cadmium- and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides*. *Chemosphere*, 197, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.0>
- Panwichian, S., & Kantachote, D. (2009). Removal of heavy metals by exopolymeric substances produced by resistant purple nonsulfur bacteria isolated from contaminated shrimp ponds, 14, 1–14. <https://doi.org/10.2225/vol14-issue4-fulltext-2>
- Quintella, C. M., Mata, A. M. T., & Lima, L. C. P. (2019). Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.019>
- Ramírez, A. (2013). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de La Facultad de Medicina*, 63(1), 51. <https://doi.org/10.15381/anales.v63i1.1477>
- Singh P., Borthakur A., Singh V. K., Singh R., Madhav S., Ahamad A., Mishra P. K. 2020. Bioremediation: a sustainable approach for management of

environmental contaminants. In *Abatement of Environmental Pollutants* (pp.1-23). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00001-1>

Schimel, J., Balser, T., & Wallenstein, M. (2007). Microbial Stress-Response Physiology and Its Implications. *Ecology*, 88(6), 1386–1394.

Saluja, B., & Sharma, V. (2013). Cadmium Resistance Mechanism in Acidophilic and Alkalophilic Bacterial Isolates and their Application in Bioremediation of Metal-Contaminated Soil. *Soil and Sediment Contamination*, 23(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.772094>

Sánchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Facultad De Farmacia Universidad Complutense Trabajo, 23. Retrieved from [http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA SANCHEZ BARRON.pdf](http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf)

Tsekova, K., Todorova, D., Dencheva, V., & Ganeva, S. (2010). Biosorption of copper(II) and cadmium(II) from aqueous solutions by free and immobilized biomass of *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology*, 101(6), 1727–1731. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.012>

Verma, S., & Kuila, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*, 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>

Yang, J., Pan, X., Zhao, C., Mou, S., Achal, V., Al-Misned, F. A. Gadd, G. M. (2016). Bioimmobilization of heavy metals in acidic copper mine tailings soil. *Geomicrobiology Journal*, 33(3–4), 261–266. <https://doi.org/10.1080/01490451.2015.1068889>.

Yang, H., Ma, H., Shi, B., Li, L., & Yan, W. (2016). ScienceDirect Experimental study of the effects of heavy metal ions on the hydrogen production performance of *Rhodobacter sphaeroides* HY01. *International Journal of Hydrogen Energy*, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.199>

Yin, K., Wang, Q., Lv, M., & Chen, L. (2019). Microorganism remediation strategies towards heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 360(October), 1553–1563. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.226>

Wu, P., Zhang, Y., Chen, Z., Wang, Y., Zhu, F., Cao, B., ... Li, N. (2018). The organophosphorus pesticides in soil was degraded by *Rhodobacter*

sphaeroides after wastewater treatment. *Biochemical Engineering Journal*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.07.019>

Zaborowska, M., Wyszowska, J., & Kucharski, J. (2015). Maintenance of soil homeostasis under exposure to cadmium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(16), 2051–2069. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1069311>

