

BIORREMEDIACIÓN: LA NATURALEZA COMO ALIADA EN LA RESTAURACIÓN.

Alejandro Zúñiga Rosales ^a, Delmar Ernesto López Quiroz ^b, Luis Dorian Valencia Ordóñez ^c,
Sergio Saldaña Trinidad ^d, Magín González Moscoso ^e, Arnulfo Rosales Quintero ^f.

^aProfesor titular de tiempo completo del programa de Ingeniería
Petrotera de la Universidad Politécnica de Chiapas.

^bAlumno de Doctorado en Ciencias de los Alimentos y Biotecnología del
Instituto Tecnológico Nacional, campus Tuxtla Gutiérrez.
Profesor de Asignatura de la Universidad Politécnica de Chiapas.

^cProfesor titular de tiempo completo del programa de Ingeniería en
Nanotecnología de la Universidad Politécnica de Chiapas.

^dProfesor titular de tiempo completo del programa de Ingeniería
en Alimentos de la Universidad Politécnica de Chiapas.

^eProfesor de Asignatura de la Universidad Politécnica de Chiapas.

^fProfesor-Investigador del Instituto Tecnológico Nacional,
campus Tuxtla Gutiérrez.

Autor de correspondencia: azuniga@ip.upchiapas.edu.mx

RESUMEN

La biorremediación constituye una estrategia importante para la recuperación de ecosistemas contaminados, usando a organismos como bacterias, hongos, algas y plantas los cuales cuentan con mecanismos metabólicos con la capacidad de transformar o inmovilizar contaminantes. Con la creciente industrialización, urbanización y la actividad agrícola, la contaminación de suelos, aguas y sedimentos representa un reto imposible de afrontar mediante tecnologías tradicionales. Este artículo explora las estrategias que podrían ser

complementarias a estas tecnologías, los cuales usando principios biológicos en sus principales modalidades (bioestimulación, bioaumentación, fitorremediación, micorremediación, bioventeo y biosorción), y los casos de aplicación de estas estrategias a casos reportados por diversos autores; la biorremediación ofrece un marco sostenible de restauración ambiental que debe de acompañarse con políticas públicas, inversión, investigación aplicada para maximizar su impacto.

Palabras clave: Biorremediación, microorganismos, contaminación, medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas continúan generando una carga ambiental sin precedentes: emisiones industriales, derrames de hidrocarburos, uso de agroquímicos, lixiviados de desechos urbanos, desechos de actividad minera, micro plásticos, entre muchos otros. Estos contaminantes impactan tanto en suelos como en aguas (superficiales como subterráneas), teniendo como consecuencia un impacto directo en los sedimentos y ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos. Ante esta situación, los métodos convencionales de remediación convencionales (excavación, traslado de residuos, tratamientos químicos, confinamientos, quemas controladas) suelen presentar desventajas: costos elevados, generación de compuestos secundarios tóxicos, invasividad, consumos energéticos y desplazamiento del problema (Sanjana et al., 2024). Por lo cual la búsqueda continua de nuevas estrategias de tratamientos a residuos se convierte en una prioridad ambiental, donde la biorremediación se posiciona como una alternativa prometedora, pues ésta consiste en utilizar procesos naturales de degradación, transformación o acumulación biológica para la restauración de un entorno de forma más sostenible, menos invasiva y con potencial para adaptaciones a gran escala. Estudios recientes muestran un renovado interés en esta alternativa, debido tanto al incremento de la contaminación como consecuencia del crecimiento poblacional o al desarrollo urbano como a la

concientización sobre el desarrollo sostenible (Lituma Carriel, 2024).

¿QUÉ ES LA BIORREMEDIACIÓN? DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS

La biorremediación es el proceso mediante el cual organismo biológico como bacterias, hongos, algas o plantas, las cuales a través de su metabolismo degradan, transforman o inmovilizan contaminantes presentes en el medio ambiente, con el objetivo de restaurar matrices dañadas (suelo, agua, sedimento) en condiciones más seguras o equivalentes a su estado natural (Lituma Carriel, 2024). Los contaminantes orgánicos pueden servir como fuente de carbono o energía para ciertos microorganismos o bien pueden ser

Figura 1: Mecanismo de bioestimulación: la adición de nutrientes para activar el microbiota del suelo.

contaminantes inorgánicos (metales o materiales radiactivos) no se degradan, pero pueden cambiar su estado (inmovilización, precipitación o reducción) o bien ser acumulados en la biomasa (Lituma Carriel, 2024), los cuales pueden ser evaluados desde dos enfoques in situ (en el mismo lugar de la contaminación) y ex situ (fuera de su sitio).

TIPOS DE BIORREMEDIACIÓN

A continuación, se describen las principales modalidades con sus particularidades, ventajas y limitaciones:

Bioestimulación

La bioestimulación consiste en el potenciar a la comunidad biológica ya existente en el sitio contaminado, mejorando las condiciones para su actividad degradadora o transformadora. Por ejemplo, la relación C:N:P (Carbono: Nitrógeno: Fosforo) como se muestra en la Fig. 1, agregar oxígeno o aireación, proporcionar co-sustratos o surfactantes (Alori et al., 2022).

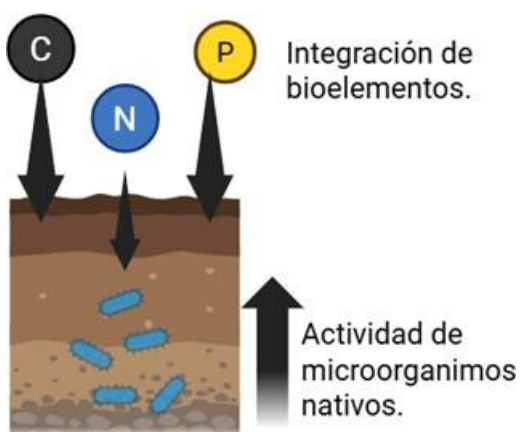


Figura 1: Mecanismo de bioestimulación: adición de nutrientes para activar el microbiota del suelo.

Ventajas: no requiere inoculación extra, aprovecha a los organismos nativos, suele tener costos bajos.

Limitaciones: si la comunidad nativa no cuenta con la capacidad metabólica adecuada, los resultados pueden ser lentos o insuficientes, la heterogeneidad del sitio puede impedir la uniformidad del tratamiento.

Bioaumentación

La bioaumentación implica la introducción de organismos (aislados o consorcios) seleccionados por su capacidad para

degradar o transformar el contaminante en cuestión como se muestra en la Fig. 2. Esta estrategia se aplica cuando la comunidad natural es insuficiente o el efecto tóxico es demasiado alto para el entorno. Requiere preparación del inóculo, adaptación al medio, posible inmovilización o encapsulación (Muter, 2023).



Figura 2: Mecanismo de bioaumentación: adición de cepas de microorganismos especializadas para mejorar la remediación.

Ventajas: permite la incorporación de biocatalizadores especializados, puede acelerar el proceso.

Limitaciones: riesgo de fallo si los organismos no se adaptan a las condiciones del sitio, posibles efectos ecológicos, costos de cultivo.

Fitorremediación

La fitorremediación representada en la Fig. 3 utiliza plantas para la extracción, acumulación, degradación o estabilización de contaminantes. Comprende sub-estrategias como fitoextracción, fitoestabilización, fitodegradación, fitovolatilización (Alsafran et al., 2022).

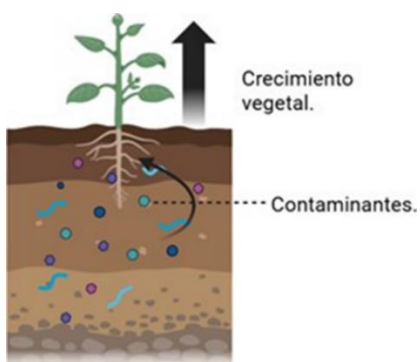


Figura 3: Principio de la fitorremediación: interacción planta-suelo para la reducción de contaminantes.

Ventajas: mínima perturbación en el sitio, posibilidad de mejorar el paisaje, adaptación a sitios grandes y extensos.

Limitaciones: velocidad lenta, dependencia del crecimiento vegetal, profundidad de raíces limitada, acumulación de contaminantes en biomasa que debe gestionarse adecuadamente.

Micorremediación

La micorremediación como se muestra en la Fig. 4 es donde se emplea hongos para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes. Los hongos presentan ventajas en su capacidad de producir enzimas extracelulares (lacasas, peroxidasa, oxidoreductasas) que permiten atacar compuestos recalcitrantes como hidrocarburos policíclicos, pesticidas, colorantes (Akpasi et al., 2023).

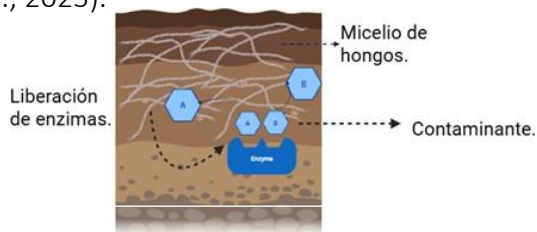


Figura 4: Mecanismo de micorremediación: acción enzimática del micelio sobre compuestos contaminantes.

Ventajas: tolerancia a condiciones adversas, capacidad de penetración del sustrato, versatilidad metabólica.

Limitaciones: el cultivo escalado puede presentar retos, manejo de la biomasa fúngica.

Bioventeo y biosorción

Bioventeo: técnica in situ en la zona insaturada del suelo que incrementa el flujo de aire/oxígeno, con la finalidad de estimular la biodegradación por organismos aerobios de contaminantes volátiles o semivolátiles.



Figura 5: Bioventeo: estimulación de microorganismos aerobios mediante inyección de oxígeno en el suelo.

Biosorción: utiliza biomasa (microbiana, vegetal, fúngica) para atraer y fijar metales u otros contaminantes a su superficie, sin

requerir de un metabolismo activo. Es especialmente útil para metales pesados que no pueden ser degradados, pero cuya movilidad o toxicidad puede reducirse mediante inmovilización.

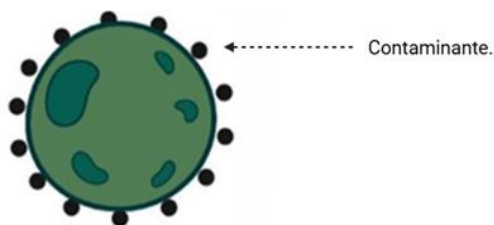


Figura 6: Mecanismo de biosorción: el contaminante se fija sobre la superficie del organismo por interacción física.

ORGANISMOS CLAVE: BACTERIA, HONGOS, ALGAS Y PLANTAS

Bacterias

Las bacterias son los principales agentes de degradación de contaminantes orgánicos. Muchas especies de bacterias cuentan con vías metabólicas para oxidar o reducir compuestos tóxicos. Existen reportes de bacterias que cuentan con la maquinaria metabólica para la degradación de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, o de pesticidas halogenados. Estudios recientes muestran el importante rol de comunidades bacterianas en suelos contaminados para la restauración de ambientes (Adedeji et al., 2022). Además, que existen una gran diversidad de bacterias con la capacidad de diferentes metabolismos aerobios y anaerobios, lo cual lo hace un organismo capaz de adaptarse a diferentes entornos.

Hongos

Los hongos cuentan con varias ventajas para la biorremediación, debido a que

cuentan con la capacidad de producción de enzimas extracelulares que pueden tener actividad sobre materia orgánica compleja, pueden realizar la colonización de sustratos difíciles, y algunos cuentan con la capacidad de formación de micorrizas en la rizosfera de las plantas (principalmente leguminosas) generando una interacción simbiótica con estas, lo cual puede tener como consecuencia un efecto positivo sobre la fitorremediación. Estas interacciones son vitales para garantizar la salud de los suelos, teniendo un impacto consecuente en los campos agrícolas, debido a que son tecnologías de bajo costo y sostenibles; estas tecnologías pueden ser fácilmente empleadas por productores rurales, por lo cual son de interés en la investigación. Por ejemplo, la micorremediación puede usarse frente a pesticidas, colorantes o hidrocarburos. Las estrategias metabólicas implícitas en hongos van desde oxidación, ligninólisis, adsorción en la matriz fúngica, formación de nodos o micelio que podría inmovilizar el contaminante (Rodrigues, 2024).

Algas

Las algas (microalgas y macroalgas) son organismos que al igual que las plantas tienen la capacidad de realizar fotosíntesis, proceso del cual fijan carbono inorgánico empleando la luz como fuente de energía para la producción de biomasa o metabolitos de interés (carbohidratos, lípidos, proteínas y pigmentos). Pueden emplearse especialmente en ambientes acuáticos dulces o salados, aunque existen reportes de la presencia de microalgas en suelo; son ampliamente empleadas en sistemas de tratamiento de agua, para capturar nutrientes (compuestos

orgánicos), absorber contaminantes o incluso degradar ciertos compuestos. Su principal ventaja es el rápido crecimiento y su alta superficie de contacto. En la biorremediación de aguas residuales, estudios demuestran la capacidad de mejorar procesos de remoción de contaminantes persistentes cuando están en consorcios, tanto con otras algas como con bacterias, incluso teniendo actividad con contaminantes persistentes en ambientes acuáticos como lo son el crudo de petróleo o compuestos policíclicos, donde la presencia de estas puede mejorar hasta de un 10 a un 40 % la tasa de remoción del contaminante. Al ser organismos fotosintéticos, son considerados productores y pueden incorporarse en ambientes sin generar un efecto trófico perjudicial; además, ciertos tipos de algas funcionan como

bioindicadores de estados de eutrofización de cuerpos de agua.

Plantas

Las plantas no sólo cuentan con la capacidad de absorber o acumular contaminantes (en el caso de metales pesados y algunos orgánicos), sino que su rizósfera alberga microorganismos que incrementan la degradación. En la fitorremediación, la planta funciona como un “biorreactor” (sistema controlado donde ocurren reacciones químicas y/o bioquímicas mediadas por un organismo vivo o derivado de uno). Estudios recientes analizan los mecanismos de absorción, acumulación y metabolismo en raíces y hojas.

APLICACIONES DE ORGANISMOS A BIORREMEDIACIÓN

Tabla 1. Diferentes organismos empleados en la biorremediación de diferentes entornos contaminados.

Tipo de organismo	Nombre	Tipo de ambiente contaminado	Eficiencia	Referencia
Plantas	<i>Azolla filiculoides</i>	Medio acuoso contaminado por oro+3 (2–10 mg/L).	<i>A. filiculoides</i> removió entre el 86 % al 100 % de oro+3; mayor efecto en pH ácido.	Antunes et al., 2001
Plantas	<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern. (OGM)	Suelos contaminados por Cd, Zn, Cr, Cu, Mn y Pb.	Transgénicas con sobreexpresión de enzimas quelantes mostraron mayor remoción.	Bennett et al., 2003
Plantas	<i>Vetiveria zizanioides</i> (L.)	Suelos con hidrocarburos de petróleo (Venezuela).	Tolerancia a crudo pesado; biodegradación de aceite/grasa baja en todos los tratamientos.	Brandt et al., 2006
Hongos	<i>Bjerkandera</i> sp.	Derrame petrolero (Oruro, Bolivia).	Degradación de fenantreno (100 mg/L) por actividad enzimática oxidativa.	TerrazasSiles et al., 2005

Hongos	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Acetato de celulosa (colillas de cigarro).	Enzimas remueven grupos acetilo y degradan celulosa; opción viable a escala.	BarrantesJiménez et al., 2024
Hongos	<i>Trametes versicolor</i>	Agua residual municipal con fármacos.	Remoción ~99 % de diclofenaco; lacasa favorece la oxidación del compuesto.	Dalecka et al., 2020
Hongos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Suelos con Cd y Pb.	Di-ramnolípido moviliza selectivamente metales: 92 % Cd y 88 % Pb.	Juwarkar et al., 2007
Hongos	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Suelos con petróleo (1.5, 3, 4.5 %).	Disminuye DBO ₅ por degradación; crecimiento en todas las concentraciones.	Patíño et al., 2021
Hongos	<i>Bacillus</i> sp.	Quinolina y derivados.	Rutas a 2(1H)-quinolinona y 8-hidroxycumarina; consorcio de lodos mejora biodegradación.	Tuo et al., 2012
Microalgas	<i>Chlorella vulgaris</i>	Aguas residuales municipales (25, 50 y 75 % primarias).	A 25 %: 100 % DQO y NH ₄ ⁺ , 82 % NO ₃ ⁻ ; biomasa 138.76 mg/L/d; lípidos 45.49 mg/L/d.	Ebrahimian et al., 2014
Microalgas	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Efluentes con Cr(VI).	Mejor con inóculo 0.8 g L ⁻¹ ; estrés mayor a 10	Kafil et al., 2022
Microalgas	<i>Spirulina platensis</i>	Aguas residuales con materiales tóxicos	Remoción 82.19 % DQO y 60.92 % Cr(VI); crecimiento sensible a la carga.	Magro et al., 2012

CONCLUSIÓN

La biorremediación representa una herramienta con un potencial a gran alcance en la restauración de diferentes ambientes, ya que permite que la propia naturaleza —hongos, algas y plantas— colabore con nosotros para revertir los efectos de la contaminación. Aunque no es una solución absoluta y no sustituye a todas las tecnologías convencionales, su capacidad de integrarse en paisajes degradados ofrece una vía sostenible y ecológica. Para materializar su potencial es fundamental el soporte tecnológico, la política pública, la vinculación con la comunidad y el monitoreo con innovación.

La selección del método depende de cada sitio; por ello, el estudio continuo de especies y entornos seguirá siendo piedra angular de la restauración ambiental del siglo XXI.

REFERENCIAS

- Adedeji, J. A., Tetteh, E. K., Opoku Amankwa, M., Asante-Sackey, D., Ofori-Frimpong, S., Armah, E. K., Rathilal, S., Mohammadi, A. H., & Chetty, M. (2022). Microbial Bioremediation and Biodegradation of Petroleum Products—A Mini Review. *Applied Sciences*, 12(23), 12212. <https://doi.org/10.3390/app122312212>
- Akpasi, S. O., Anekwe, I. M. S., Tetteh, E. K., Amune, U. O., Shoyiga, H. O., Mahlangu,

- T. P., & Kiambi, S. L. (2023). Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—A Review. *Applied Sciences*, 13(8), 4978. <https://doi.org/10.3390/app13084978>
- Alori, E. T., Gabasawa, A. I., Elenwo, C. E., & Agbeyegbe, O. O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.937186>
- Alsafran, M., Usman, K., Ahmed, B., Rizwan, M., Saleem, M. H., & Al Jabri, H. (2022). Understanding the Phytoremediation Mechanisms of Potentially Toxic Elements: A Proteomic Overview of Recent Advances. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.881242>
- Antunes, A. P. M., Watkins, G. M., & Duncan, J. R. (2001). Batch studies on the removal of gold(III) from aqueous solution by *Azolla filiculoides*. *Biotechnology Letters*, 23(4), 249–251. <https://doi.org/10.1023/A:1005633608727>
- Barrantes-Jiménez, I., Marín-Sandí, E., Murillo-Murillo, M., Rojas-Rojas, D., Vallecillo-Cedeño, S., & Valverde-Rojas, S. (2024). Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polímeros sintéticos como el acetato de celulosa. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6478>
- Bennett, L. E., Burkhead, J. L., Hale, K. L., Terry, N., Pilon, M., & PilonSmits, E. A. H. (2003). Analysis of Transgenic Indian Mustard Plants for Phytoremediation of MetalContaminated Mine Tailings. *Journal of Environmental Quality*, 32(2), 432–440. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.4320>
- Brandt, R., Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C., & Broll, G. (2006). Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarboncontaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*, 8(4), 273–284. <https://doi.org/10.1080/15226510600992808>
- Dalecka, B., Juhna, T., & Rajarao, G. K. (2020). Constructive use of filamentous fungi to remove pharmaceutical substances from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 100992. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100992>
- Ebrahimian, A., Kariminia, H.-R., & Vosoughi, M. (2014). Lipid production in mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* in a mixture of primary and secondary municipal wastewater. *Renewable Energy*, 71, 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.031>
- Juwarkar, A. A., Nair, A., Dubey, K. V., Singh, S. K., & Devotta, S. (2007). Biosurfactant technology for remediation of cadmium and lead contaminated soils. *Chemosphere*, 68(10), 1996–2002. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.02.027>
- Kafil, M., Berninger, F., Koutra, E., & Kornaros, M. (2022). Utilization of the microalga *Scenedesmus quadricauda* for hexavalent chromium bioremediation and biodiesel production. *Bio- resource Technology*, 346, 126665. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126665>
- Lituma Carriel, S. del R. (2024). Bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils: review and perspective for Ecuador in the Latin American context. *EVitroKhem*, 3, 145. <https://doi.org/10.56294/evk2024145>
- Magro, C. D., Deon, M. C., Rossi, A. De, Reinehr, C. O., Hemkemeier, M., & Colla, L. M. (2012). Chromium (VI) biosorption and removal of chemical oxygen demand by *Spirulina platensis* from wastewatersupplemented culture medium. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(12), 1818–1824. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.689539>
- Muter, O. (2023). Current Trends in Bioaugmentation Tools for Bioremediation: A Critical Review of Advances and Knowledge Gaps. *Microorganisms*, 11(3), 710. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>

Patiño, O., Robles, H., & León, L. (2021). Biodegradación de petróleo por *Bacillus thuringiensis* como alternativa para la recuperación de suelos agrícolas. *Arnaldoa*, 28(2), 339–348.

Rodrigues, A. R. da S. P. (2024). Fitorremediación y micorremediación de suelos contaminados por plomo (Pb) y cadmio (Cd). *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, 425–437. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2024.17.2.85712>

Sanjana, M., Prajna, R., Katti, S. U., & Kavitha, R. V. (2024). Bioremediation – the recent drift towards a sustainable environment.

Environmental Science: Advances, 3(8), 1097–1110. <https://doi.org/10.1039/D3VA00358B>

Terrazas-Siles, E., Alvarez, T., Guieysse, B., & Mattiasson, B. (2005). Isolation and characterization of a white rot fungus *Bjerkandera* sp. strain capable of oxidizing phenanthrene. *Biotechnology Letters*, 27(12), 845–851. <https://doi.org/10.1007/s10529-005-6242-4>

Tuo, B., Yan, J., Fan, B., Yang, Z., & Liu, J. (2012). Biodegradation characteristics and bioaugmentation potential of a novel quinoline-degrading strain of *Bacillus* sp. isolated from petroleum-contaminated soil. *Bioresource Technology*, 107, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.114>