

Biorremediación en agroecosistemas

Gobinath **Chandrakasan**

La contaminación del suelo representa una seria amenaza a la agricultura, los ecosistemas y la salud humana. Habitualmente la remediación es costosa y dañina para el medio ambiente, mientras que la biorremediación aprovecha los microorganismos y las plantas para desintoxicar los suelos de manera eficiente y sostenible, promoviendo prácticas más ecológicas y ecosistemas más saludables (Chahal *et al.*, 2023).

La biorremediación es un proceso que utiliza entidades biológicas para degradar o transformar desechos peligrosos en formas menos tóxicas bajo condiciones controladas. Este enfoque multidisciplinario está ganando prominencia como una tecnología alternativa para la limpieza efectiva de sitios contaminados, ya que proporciona una solución sostenible al utilizar microorganismos y plantas para desintoxicar y restaurar la salud del suelo, asegurando así su resiliencia para las generaciones futuras (Gonzalez-Gonzalez y Bashan, 2023).

Este proceso utiliza la capacidad innata de los microorganismos y las plantas para descomponer, absorber o transformar los contaminantes del suelo, y por tanto, para restaurar eficazmente su estructura física, equilibrio químico y vitalidad biológica. Las estrategias de biorremediación microbiana juegan un papel vital en los consorcios de organismos nativos de sitios contaminados, ya que aprovechan su gran potencial metabólico para reducir los contaminantes (Sharma *et al.*, 2022). Si bien el uso de pesticidas es esencial en la agricultura moderna para controlar

plagas, malezas y enfermedades, las bioestimulaciones son una solución prometedora por el aporte de nutrientes clave (carbono, nitrógeno y fósforo), además de que potencian la actividad microbiana local estimulando la producción de enzimas capaces de transformar moléculas tóxicas en otras menos dañinas (Juárez-Maldonado *et al.*, 2021).

MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN

Las comunidades microbianas son fundamentales en la biorremediación del suelo. Las bacterias, los hongos y las arqueas presentan diversas vías metabólicas que les permiten descomponerse en diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluidos hidrocarburos, metales pesados y pesticidas. En particular, las bacterias demuestran una eficiencia potencial en sus efectos sobre el metabolismo de contaminantes orgánicos, transformándolos en compuestos menos dañinos o completamente benignos.

Algunos géneros bacterianos, como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Deinococcus*, han sido ampliamente estudiados por su papel en la biorremediación. Las especies del género *Pseudomonas* son reconocidas por su capacidad para degradar hidrocarburos y otros solventes industriales, mientras que las especies de *Bacillus* son eficaces en la descomposición de pesticidas y contaminantes orgánicos. Además, el género *Deinococcus* se destaca por su resistencia en ambientes extremos, lo que contribuye a su habilidad para metabolizar contaminantes industriales.

Al aprovechar la diversidad metabólica de estos microorganismos, las estrategias de biorremediación pueden optimizarse para abordar numerosas formas de contaminación del suelo, promoviendo así la restauración ambiental y la sostenibilidad.

Los hongos desempeñan un papel esencial en la biorremediación gracias a su capacidad para degradar contaminantes ambientales complejos. Destacan los hongos filamentosos *Phanerochaete chrysosporium* y *Trametes versicolor*, reconocidos por su habilidad para descomponer hidrocarburos

aromáticos policíclicos (HAP) y clorofenoles. Este talento único se debe principalmente a la producción de enzimas extracelulares como lacasas y peroxidasas, que les permiten oxidar y descomponer eficazmente compuestos altamente resistentes, lo cual contribuye de manera decisiva a la restauración ambiental. Por otro lado, los hongos micorrízicos promueven la absorción de nutrientes y la descomposición de materia orgánica, mejorando la estructura del suelo y aumentando su capacidad de retención de agua (Andrade-Hoyos *et al.*, 2023).

MECANISMOS DE BIORREMEDIACIÓN

POR MICROORGANISMOS

La biorremediación incluye varios mecanismos mediante los cuales los microorganismos contribuyen a la degradación de contaminantes en el medio ambiente. Uno de los más destacados es la biodegradación, un proceso en el que los microorganismos transforman moléculas complejas en compuestos más simples y menos dañinos bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

En la biodegradación aeróbica, los microorganismos utilizan oxígeno como aceptor de electrones para oxidar los contaminantes, mientras que en la biodegradación anaeróbica se emplean aceptores alternativos como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono para completar el proceso.

Otro mecanismo clave es la biosorción, en la que los contaminantes son adsorbidos en las paredes celulares de los microorganismos que actúan como una barrera inicial.

Además, la bioacumulación permite la absorción activa de contaminantes dentro de las células microbianas a través de sus membranas, donde pueden transformarse o almacenarse temporalmente, contribuyendo a su eliminación del entorno. Por ejemplo, las bacterias reductoras de sulfato utilizan enzimas reductasas para reducir compuestos de azufre en ambientes anaeróbicos, mientras que las peroxidasas y oxidasas fúngicas pueden descomponer compuestos orgánicos persistentes, como los bifenilos policlorados (PCBs) (Alvarez Acuña *et al.*, 2017).

PLANTAS EN LA BIORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una técnica sostenible que emplea plantas para descontaminar y recuperar suelos afectados. Algunas especies poseen la capacidad de absorber contaminantes a través de sus raíces y almacenarlos en sus tejidos, mientras que otras son capaces de transformarlos en compuestos menos dañinos. Además de eliminar contaminantes, las plantas contribuyen a estabilizar el suelo, prevenir la erosión y fomentar la biodiversidad del ecosistema. Entre los casos más recientes de fitorremediación destacan el uso de girasoles (*Helianthus annuus*) para la extracción de metales pesados, alfalfa (*Medicago sativa*) para mejorar la salud del suelo (Tussipkan y Manabayeva, 2022), y ciertas especies de plantas herbáceas para la degradación de hidrocarburos.

MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN

Existen diversos mecanismos de fitorremediación, entre los que destacan los siguientes:

- **Fitoextracción.** Este mecanismo consiste en la absorción de contaminantes presentes en el suelo por medio de las raíces de las plantas y su posterior acumulación en partes aéreas, como tallos y hojas. Las especies conocidas como hiperacumuladoras tienen la capacidad de tolerar y concentrar altos niveles de metales pesados y otros contaminantes sin sufrir efectos negativos significativos. Este método es particularmente eficaz para remediar suelos contaminados con metales como zinc, cadmio y plomo (Asare *et al.*, 2023).
- **Fitodegradación.** Este proceso implica la degradación de contaminantes orgánicos absorbidos por las plantas mediante la acción de enzimas específicas, como peroxidasas, oxidasas y deshalogenasas. Es especialmente útil para remediar compuestos orgánicos como pesticidas, herbicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP).
- **Fitorrizofiltración.** Las raíces de las plantas actúan como filtros capaces de absorber, concentrar y precipitar contaminantes presentes en el agua. Las plantas acuáticas, como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la juncia (*Scirpus* spp.) destacan por su capacidad para reducir contaminantes,



© Honorio Cruz. Sin título. Cerámica de alta temperatura.

especialmente metales pesados y nutrientes excesivos en aguas residuales o subterráneas.

- **Fitovolatilización.** Este mecanismo se aplica a contaminantes que pueden transformarse en formas volátiles.

- **Fitorrecuperación.** Este enfoque está orientado a restaurar la estructura y las funciones ecológicas del suelo.

CONSOLIDACIÓN DE MICROBIOS Y PLANTAS EN EL AGROSISTEMA

Esta integración ofrece numerosas ventajas y mejora la eficacia de la eliminación de contaminantes, acelera su descomposición y ayuda a restaurar la salud y la fertilidad del suelo. Por ejemplo, los hongos micorrízicos pueden asociarse con las raíces de ciertas plantas para aumentar su capacidad de absorber metales pesados y otros contaminantes del suelo (Camarena-Gutiérrez, 2012). La integración de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés) desempeña un



© Honorio Cruz. Sin título. Mural en cerámica de alta temperatura.

papel clave al estimular el crecimiento de las plantas y fortalecer su resistencia frente a condiciones de estrés. Las algas y las plantas destacan por su alta capacidad para absorber nitrógeno, fósforo, azufre, minerales y metales del entorno, contribuyendo significativamente a la remediación y mejora de la calidad ambiental (Farid et al., 2023).

La biorremediación es una alternativa efectiva y sostenible. Es fundamental investigar continuamente sus mecanismos biológicos para mejorar su eficiencia y adaptabilidad a diferentes contextos.

REFERENCIAS

- Alvarez Acuña JV (2017). Cultivo de los Microorganismos Nativos en la reducción del contenido de Bifenilos Policlorados (PCBS) en el suelo de la subestación eléctrica de Puente Piedra. S.I.: Universidad César Vallejo. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3482?locale-attribute=es>.
- Andrade-Hoyos P, Rivera-Jiménez MN, Landero-Valenzuela N et al. (2023). Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma spp.* en la agricultura: una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Argentina de Microbiología* 55(4):366-377.
- Asare MO, Száková J and Tlustoš P (2023). Mechanisms of As, Cd, Pb, and Zn hyperaccumulation by plants and their effects on soil microbiome in the rhizosphere. *Frontiers in Environmental Science* 11:1157415.
- Camarena-Gutiérrez G (2012). Interacción planta-hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 18(3):409-421.
- Chahal S, Wang P, Bueno V et al. (2023). Effect of emerging contaminants on soil microbial community composition, soil enzyme activity, and strawberry plant growth in polyethylene microplastic-containing soils. *Environmental Science: Advances* 2(4):629-44.
- Farid N, Ullah A, Khan S et al. (2023). Algae and Hydrophytes as Potential Plants for Bioremediation of Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Water* 15(12):2142.
- Gonzalez-Gonzalez LM and de-Bashan LE. The Potential of Microalgae-Bacteria Consortia to Restore Degraded Soils. *Biology* 12(5):693.
- Juárez-Maldonado A, Tortella G, Rubilar O et al. (2021). Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research* 31:113-26.

Gobinath Chandrakasan
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
gobi.marine@gmail.com