South American Publishing

SAP Multidisciplinary Open. 2025; 3:206
doi: 10.62486/mo2025206

REVIEW

Bioremediation using genetically modified microorganisms for the degradation of environmental pollutants

Biorremediación mediante microorganismos modificados genéticamente para la degradación de contaminantes ambientales

José Lázaro Francés Mesa[1] ✉, Nayeris Brito Espinosa[2] ✉

[1]Facultad de Biología de la Universidad de La Habana. Microbiología y Virología, Cuba.
[2]Facultad de Biología de la Universidad de La Habana. Bioquímica y Biología Molecular, Cuba.

Cite as
Francés Mesa JL, Brito Espinosa N. Bioremediation using genetically modified microorganisms for the degradation of environmental pollutants. SAP Multidisciplinary Open. 2025; 3:206. https://doi.org/10.62486/mo2025206

Publication History
Submitted: 07-06-2024
Revised: 20-09-2024
Accepted: 15-02-2025
Published: 16-02-2025

Corresponding Author
José Lázaro Francés Mesa ✉

ABSTRACT

Introduction: the study addressed the environmental problems caused by soil and water contamination due to the excessive use of agrochemicals and industrial wastes. It was pointed out that intensive agricultural production and population growth have increased the accumulation of pollutants, generating negative impacts on biodiversity and human health. In the face of this environmental crisis, remediation methods were explored, highlighting bioremediation as a sustainable and efficient strategy based on microorganisms for the elimination of pollutants.
Development: different bioremediation strategies were analyzed, differentiating between in situ and ex situ techniques. Processes such as biospraying, biostimulation and bioaugmentation, which allow the degradation of contaminants through microbial activity, were described. In addition, the impact of biotechnology on bioremediation was discussed, highlighting the use of omics tools and the application of genetically modified microorganisms to improve the efficiency of these processes. It was emphasized that genetic engineering and genome editing have made it possible to optimize the metabolic capacities of bacteria and fungi to transform toxic substances into less hazardous compounds.
Conclusion: it was concluded that bioremediation represents a viable and ecological alternative for dealing with environmental contamination. However, its large-scale application still faces challenges, such as the regulation of genetically modified microorganisms and the need for more detailed studies on its long-term impact. The integration of new biotechnological technologies could optimize environmental remediation and ensure its sustainability in the future.

Keywords: Bioremediation; Environmental Contamination; Microorganisms; Biotechnology; Genetic Engineering.

RESUMEN

Introducción: el estudio abordó la problemática ambiental causada por la contaminación del suelo y el agua debido al uso excesivo de agroquímicos y residuos industriales. Se destacó que la producción agrícola intensiva y el crecimiento de la población han incrementado la acumulación de contaminantes, generando impactos negativos en la biodiversidad y en la salud humana. Ante esta crisis ambiental, se exploraron métodos de remediación, resaltando la biorremediación como una estrategia sostenible y eficiente basada en microorganismos para la eliminación de contaminantes.
Desarrollo: se analizaron diferentes estrategias de biorremediación, diferenciando entre técnicas in situ y ex situ. Se describieron procesos como la bioaspersión, la bioestimulación y la bioaumentación, los cuales permiten la degradación de contaminantes mediante la actividad microbiana. Además, se discutió el impacto de la biotecnología en la biorremediación, resaltando el uso de herramientas ómicas y la aplicación de microorganismos genéticamente modificados para mejorar la eficiencia de estos procesos. Se destacó que la ingeniería genética y la edición del genoma han permitido optimizar las capacidades metabólicas de bacterias y hongos para transformar sustancias tóxicas en compuestos menos peligrosos.
Conclusión: se concluyó que la biorremediación representa una alternativa viable y ecológica para enfrentar la contaminación ambiental. Sin embargo, su aplicación a gran escala aún enfrenta desafíos, como la regulación de microorganismos modificados genéticamente y la necesidad de estudios más detallados sobre su impacto a largo plazo. La integración de nuevas tecnologías biotecnológicas podría optimizar la remediación ambiental y garantizar su sostenibilidad en el futuro.

Palabras clave: Biorremediación; Contaminación Ambiental; Microorganismos; Biotecnología; Ingeniería Genética.

© 2025; The Authors. This Open access article is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

INTRODUCCIÓN

La escasez de tierras agrícolas, el crecimiento de la población, la pérdida de alimentos por desastres naturales y plagas, y la crisis del agua son factores que limitan el desarrollo económico de los países en vías de desarrollo. Aumentar los rendimientos agrícolas en el futuro será difícil bajo estas restricciones. Para lograr los objetivos alimentarios, los agricultores han adoptado tecnologías avanzadas como semillas híbridas, riego sistemático y uso de fertilizantes y pesticidas químicos. Sin embargo, estos avances agrícolas han generado amenazas ambientales como disminución de la fertilidad del suelo, mayor acidificación, mayor lixiviación de nitratos, más resistencia de malezas a herbicidas y menor biodiversidad del suelo. El uso excesivo e inadecuado de pesticidas afecta a todo el ecosistema, ya que sus residuos contaminan la cadena alimentaria, el suelo, el aire y las aguas. Estos productos químicos también se han demostrado peligrosos para la salud (Gangola et al, 2023).

La Unión Europea y Estados Unidos han experimentado un aumento significativo en la producción de residuos peligrosos y no peligrosos en los últimos años. La producción anual de residuos sólidos urbanos en China también se espera que crezca considerablemente (El Asri et al, 2022). Además, las actividades industriales, especialmente la minería, han contribuido a la contaminación de los sistemas de aguas superficiales y subterráneas con diversos compuestos químicos, como hidrocarburos clorados y radón. Esta contaminación representa un desafío ambiental importante que requiere atención. La contaminación por arsénico en las aguas subterráneas se considera la peor intoxicación masiva a nivel mundial. Se estima que más de 100 millones de personas y 70 países se ven afectados por este problema (Paul et al, 2019).

Además, el informe del Banco Mundial "What a Waste 2.0" indica que el mundo produce 2,010 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año, de los cuales al menos el 33 % no se gestiona de manera ambientalmente responsable. Por ejemplo, la basura plástica que asfixia nuestros océanos y representa el 90 % de todos los desechos marinos (Kaura et al, 2023).

Métodos como la pirólisis, el reciclaje, el relleno de tierras contaminadas y la incineración se utilizan para reducir la contaminación del suelo y la toxicidad de los campos agrícolas. Sin embargo, estos métodos físicos y químicos no son lo suficientemente económicos ni adecuados para remediar el medio ambiente. El uso de agentes microbiológicos sería una opción prometedora para aprovechar la capacidad de los mismos para limpiar contaminantes en sitios afectados. Esta alternativa podría ser más efectiva, rentable, menos peligrosa para los organismos y más ecológica. La biodegradación, llevada a cabo con la ayuda de algas, hongos, bacterias y actinomicetos, es un proceso natural que no produce metabolitos intermedios dañinos y es una técnica eficaz para eliminar sustancias tóxicas. Diversos grupos de microorganismos presentes en diferentes hábitats, como aguas dulces y marinas, aguas residuales y suelos, tienen la capacidad de metabolizar compuestos extraños y convertirlos en minerales naturales que pueden ser utilizados por las plantas (Gangola et al, 2023).

La remediación ambiental suele recurrir a métodos químicos como reducción, lavado, intercambio iónico, adsorción y filtración. También existen métodos biotecnológicos para eliminar contaminantes, como rizofiltración, biosorción, cultivo de tierras y fitorremediación. Los procesos biológicos son los más utilizados porque no requieren químicos tóxicos ni mucho consumo de energía (Naik et al, 2023).

La biorremediación podría ser una alternativa innovadora y efectiva para remediar la acumulación de metales pesados. A diferencia de otros métodos, las estrategias biológicas son respetuosas con el medio ambiente y aceptables socialmente. Además, existe una amplia diversidad de organismos con capacidades aún no explotadas completamente, y estos pueden ser modificados genéticamente para acelerar el proceso de limpieza ambiental (Mathew et al, 2023).

Dada la importancia del contexto planteado, la presente investigación se trazó como objetivo principal analizar la eficacia de la biorremediación mediante microorganismos modificados genéticamente como una estrategia innovadora para la degradación de contaminantes ambientales.

DESARROLLO

La biorremediación es un proceso que utiliza organismos vivos, como bacterias y hongos, para eliminar contaminantes de sitios contaminados. Los microbios pueden transformar metales pesados a estados menos tóxicos o menos solubles en agua, lo que reduce su biodisponibilidad. Estos microorganismos usan diferentes estrategias, como oxidación, inmovilización, transformación, unión y volatilización, para eliminar los metales pesados del sitio contaminado. Algunos microbios incluso pueden reducir la toxicidad de los metales a través de procesos metabólicos enzimáticos (Khan et al, 2023).

La biorremediación se considera efectiva cuando una cepa bacteriana eficiente puede degradar una gran cantidad de contaminantes a una cantidad mínima de productos de degradación inofensivos o no tóxicos, a una velocidad adecuada y en un tiempo limitado (Patil et al, 2019).

Los avances recientes en herramientas de ingeniería metabólica y biología de sistemas han abierto nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia de las cepas microbianas y aumentar su potencial de biodegradación. La ingeniería biológica no es la única solución, pero es única entre los diversos enfoques necesarios para abordar la crisis climática. Las soluciones biológicas diseñadas de manera segura y responsable pueden ser más sostenibles e integrables en entornos naturales, y más duraderas (Aurand et al, 2024).

La biorremediación in situ implica el tratamiento del material contaminado en el lugar. Algunas de las tecnologías de biorremediación in situ incluyen:

1. Bioaspersión: Los microorganismos nativos degradan los contaminantes en la zona saturada. Se inyecta aire (u oxígeno) y nutrientes para aumentar la actividad biológica de los microorganismos.
2. Bioventilación: Los microorganismos nativos degradan los contaminantes en la zona no saturada. Los sistemas de bioventilación suministran aire de la atmósfera al suelo por encima del nivel freático a través de pozos de inyección.

3. Bioestimulación: Se agregan aceptores y donantes de electrones, nitrógeno, oxígeno y carbono para estimular las poblaciones microbianas nativas.
4. Bioaumentación: Se agregan bacterias seleccionadas a un área contaminada.

Las técnicas de biorremediación ex situ implican excavar y apilar el suelo contaminado, junto con la adición de materiales orgánicos y desechos. El crecimiento bacteriano se ve facilitado por tuberías que permiten la circulación del aire para la respiración microbiana. En comparación con otros métodos, la biorremediación en suspensión en un biorreactor es un proceso más rápido, ya que se mezcla el suelo contaminado con agua, nutrientes y oxígeno para crear el entorno ideal para que los microorganismos degraden los contaminantes (Debbarma et al, 2023).

Biotecnología en la biorremediación

En los últimos años, los avances en áreas como la genómica, la metagenómica, la proteómica, la bioinformática y los análisis de alto rendimiento han permitido estudiar en detalle la microbiota importante ecológicamente, identificando vías clave de biodegradación de pesticidas y la capacidad de los microbios para adaptarse a entornos desfavorables.

Los progresos en metagenómica y secuenciación han abierto nuevas oportunidades para buscar nuevos genes catabólicos y sus mecanismos reguladores en microbios cultivables y no cultivables en diversos ecosistemas. Explorar los mecanismos moleculares de biodegradación de contaminantes por parte de los microbios y su interacción con el medio ambiente es importante para aplicar con éxito estas técnicas en estudios de remediación in situ (Gangola et al, 2023).

Las nanopartículas fabricadas mediante métodos biológicos son una alternativa más ecológica y eficiente a los procesos físicos o químicos tradicionalmente utilizados para el tratamiento de aguas residuales. Estas nanopartículas, ya sean bimetálicas o funcionalizadas con enzimas, pueden emplearse en el tratamiento multimodal de efluentes, eliminando metales y degradando colorantes. Por otra parte, las tecnologías ómicas, que estudian conjuntos completos de moléculas como genes, proteínas y metabolitos, se han demostrado como métodos eficientes y rentables para la biorremediación. El uso de técnicas ómicas, como la metagenómica, la genómica funcional, la proteómica y la metabolómica, ha permitido un mejor entendimiento de la fisiología y genética de las comunidades microbianas. Estas herramientas han facilitado el estudio de los organismos individuales y han explicado cómo los factores ambientales afectan a los microorganismos. Además, la fluxómica, que evalúa el flujo metabólico utilizando trazadores isotópicos, ha ayudado a identificar los procesos metabólicos que sustentan las funciones microbianas esenciales (Patil et al, 2023), (Wani et al, 2023).

La bioinformática es un campo de la biología que utiliza herramientas computacionales y estadísticas para resolver problemas biológicos. Incluye análisis filogenético, extracción de datos, determinación de la filogenia molecular más cercana y biología de sistemas, todo lo cual ayuda a simplificar el proceso de biorremediación (Raj et al, 2023).

Ingeniería genética aplicada a la biorremediación

La ingeniería genética es una tecnología moderna que permite crear microorganismos diseñados para tratar contaminantes específicos. Los genes de estos microorganismos se modifican para lograr el efecto deseado. Los estudios demuestran que los microorganismos genéticamente modificados pueden degradar compuestos específicos. Esto se logra mediante la alteración de la especificidad y afinidad de las enzimas, la construcción y regulación de las vías metabólicas, el desarrollo y control de los bioprocesos, y el uso de sensores bioinformáticos. Además, la aplicación de técnicas de ingeniería genética, como la tecnología del ADN recombinante, ha permitido mejorar la capacidad de los microorganismos para generar más energía, aumentar la actividad redox, eliminar vías limitantes y modificar los genes responsables de las rutas metabólicas, lo que resulta en una mayor degradación de pesticidas y otros contaminantes químicos (Patel et al, 2022), (Debbarma et al, 2023).

La edición del genoma es una técnica revolucionaria que permite modificar secuencias de ADN mediante el uso de herramientas moleculares especialmente diseñadas. Estas herramientas tienen diversas aplicaciones en investigaciones sobre animales, plantas y microorganismos. Los métodos de edición genética implican identificar la secuencia del gen objetivo, generar una ruptura específica en ese sitio y luego reparar la rotura a través de un proceso de recombinación homóloga, lo que resulta en la modificación (inserción o eliminación) del gen deseado o un fragmento de la secuencia. Estas herramientas de edición genética tienen un gran potencial para mejorar la eficiencia de los procesos de biorremediación, como la eliminación de sustancias dañinas, la transformación de compuestos tóxicos en formas menos peligrosas y la degradación de pesticidas. Las principales herramientas de edición genética son las nucleasas con dedos de zinc (ZFN), las nucleasas efectoras similares a activadores de la transcripción (TALEN) y el sistema CRISPR-Cas.

En los últimos años, las herramientas de edición genómica como CRISPR-Cas9 y CRISPR-Cpf1 han demostrado su potencial para mejorar las características agrícolas y la eficiencia de la fitorremediación, al fortalecer la interacción entre plantas y microorganismos. Se ha reportado que varios genes microbianos contienen atributos de fitorremediación, como aquellos que codifican enzimas que degradan contaminantes como el 2,4-dinitriotolueno, el arseniato, el ácido clorobenzoico o el tricloroetileno. Estos genes han mostrado un gran potencial para reducir los contaminantes del suelo, y su sobreexpresión se puede lograr utilizando herramientas de edición genómica en microorganismos promotores del crecimiento vegetal.

Los organismos genéticamente modificados (OGM) pueden afectar potencialmente el crecimiento y sostenibilidad de otras especies, incluyendo plantas, animales y seres humanos. Algunos de estos riesgos podrían mitigarse usando "interruptores de muerte" genéticos que eliminen rápidamente los OGM del medio ambiente una vez cumplido su propósito, o mediante la aplicación de sustancias químicas específicas (Barooah et al, 2023).

La ingeniería genética y la biología molecular han demostrado ser fundamentales para erradicar la contaminación ambiental causada por la negligencia humana. La ingeniería de proteínas oxigenasas es una técnica molecular utilizada para mejorar la degradación oxidativa de sitios contaminados. Las enzimas oxigenasas participan en el proceso de degradación, catalizando la reducción de oxígeno e incorporando monoxigenasas o dioxigenasas en el sustrato que se oxida. Estos catalizadores de oxigenasa suelen ser eficaces en la degradación de muchos compuestos aromáticos.

El tolueno (un hidrocarburo aromático) y el mercurio en forma iónica pueden ser degradados de manera más segura y ecológica mediante el uso de la ingeniería genética, en comparación con los métodos tradicionales (Wilgince Apollon et al, 2023).

El uso de organismos genéticamente modificados (OGM) que incluyen a Pseudomonas aeruginosa, Neurospora crassa y Escherichia coli es una estrategia innovadora para remediar la contaminación en aguas y suelos. Estas propiedades deseables, como la tolerancia a metales, la sobreproducción de proteínas y péptidos quelantes de metales, y la acumulación de metales, han permitido que los OGM sean efectivos para biorremediar una amplia gama de contaminantes.

Los avances en técnicas biotecnológicas como el ADN recombinante y la transferencia natural de genes pueden facilitar la producción de enzimas específicas que mejoren la degradación de compuestos orgánicos peligrosos, tanto por bacterias endófitas como rizosféricas de origen vegetal, contribuyendo así a mejorar la descomposición de estos contaminantes en áreas contaminadas. Además, se ha demostrado que cepas de Pseudomonas pueden biodegradar los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) con un significativo aumento de la actividad de la deshidrogenasa en el suelo, lo que incrementa su capacidad de descomposición del petróleo hasta 100 veces más que los aislamientos silvestres (naturales) que se encuentran en plásmidos extracromosómicos (Nath et al, 2023).

CONCLUSIONES

Es fundamental estudiar la relación entre el efecto ambiental, el comportamiento y el destino de los contaminantes, así como la eficiencia de las diferentes tecnologías de biorremediación. Se debe evitar la transmisión horizontal de genes de microorganismos modificados a microorganismos nativos, el uso de ARN antisentido y genes suicidas, así como el uso de marcadores de resistencia a antibióticos, que pueden ser reemplazados por otros marcadores seleccionables para prevenir la transferencia involuntaria de genes de resistencia. Los problemas regulatorios y los riesgos asociados con los microorganismos genéticamente modificados (MGM) son un importante impedimento para su uso. Sin embargo, esto se puede resolver desarrollando e implementando MGM suicidas. Si se obtiene información detallada sobre las herramientas de biorremediación, sus genomas, vías y funciones bioquímicas y mecanismos, esta será la tecnología más eficiente en el futuro para permitir el uso de MGM en enfoques de biorremediación a gran escala.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Curación de datos: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Análisis formal: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Investigación: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Metodología: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Administración del proyecto: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Recursos: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Software: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Supervisión: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Validación: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Visualización: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Redacción – borrador original: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.
Redacción – revisión y edición: José Lázaro Francés Mesa, Nayeris Brito Espinosa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Apollon, W., Flores-Breceda, H., Méndez-Zamora, G., Gómez-Leyva, J. F., Luna-Maldonado, A. I., & Kamaraj, S.-K. (2022). Importance of genetically engineered microbes (GEMs) in bioremediation of environmental pollutants. En Omics for Environmental Engineering and Microbiology Systems (pp. 203–219). CRC Press. DOI: 10.1201/9781003247883-10

2. Aurand, E. R., Moon, T. S., Buan, N. R., Solomon, K. V., Köpke, M., & EBRC Technical Roadmapping Working Group. (2024). Addressing the climate crisis through engineering biology. Npj Climate Action, 3(1). https://doi.org/10.1038/s44168-023-00089-8

3. Barooah, M., & Hazarika, D. J. (2022). Genome editing tools. En Omics for Environmental Engineering and Microbiology

Systems (pp. 159–180). CRC Press. DOI: 10.1201/9781003247883-8

4. Debbarma, P., Sharma, R., Luthra, N., Pandey, S. C., & Singh, S. V. (2023). Microbial consortia and their application for environmental sustainability. En Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management (pp. 205–222). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91643-1.00012-0

5. El Asri, O., Fadlaoui, S., & Afilal, M. E. (2022). Applications of microbes in municipal solid waste treatment. En Environmental and Microbial Biotechnology (pp. 587–607). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2225-0_21

6. Gangola, S., Joshi, S., Bhandari, G., Bhatt, P., Kumar, S., & Pandey, S. C. (2023). Omics approaches to pesticide biodegradation for sustainable environment. En Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management (pp. 191–203). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91643-1.00010-7

7. Kaura, S., Mathur, A., & Kalra, A. (2023). Bacteria and pollutants. En Modern Approaches in Waste Bioremediation (pp. 339–364). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24086-7_16

8. Khan, A., Sharma, R. S., Panthari, D., Kukreti, B., Singh, A. V., & Upadhayay, V. K. (2023). Bioremediation of heavy metals by soil-dwelling microbes: an environment survival approach. En Advanced Microbial Techniques in Agriculture, Environment, and Health Management (pp. 167–190). Elsevier. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91643-1.00002-8

9. Naik, H. S., Sah, P. M., Dhage, S. B., Gite, S. G., & Raut, R. W. (2023). Nanotechnology for bioremediation of industrial wastewater treatment. En Modern Approaches in Waste Bioremediation (pp. 265–298). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24086-7_14

10. Nath, D., Kumari, V., Laik, R., & Mukhopadhyay, R. (2023). Genetically engineered microorganisms. En Handbook of Microbial Biotechnology (pp. 345-367). Taylor & Francis. https://doi.org/10.1201/9781003247883-23

11. Mathew, J. T., Adetunji, C. O., Inobeme, A., Monday, M., Azeh, Y., Otori, A. A., Shaba, Mathew, J. T., Adetunji, C. O., Inobeme, A., Monday, M., Azeh, Y., Otori, A. A., Shaba, E. Y., Mamman, A., & Ezekiel, T. (2023). Removal of heavy metals using bio-remedial techniques. En Modern Approaches in Waste Bioremediation (pp. 117–130). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24086-7_6

12. Paul, D., Kumar, S., Banskar, S., Mohapatra, B., Shouche, Y. S. (2019). MICROBIOLOGY OF AQUEOUS ENVIRONMENTS: INTERACTIONS, EFFECTS, AND HOMEOSTASIS. En Kumar Verma, D., MICROBIOLOGY FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE, SOIL HEALTH, AND ENVIRONMENTAL PROTECTION (pp. 297-340). Apple Academic Press Inc.

13. Patil, M. P., Jobanputra, A. H., Verma, D. K., Srivastaba, S., Dwividi, A., K. (2019). BIOREMEDIATION OF PESTICIDES: AN ECO-FRIENDLY APPROACH FOR A CLEAN ENVIRONMENT. MICROBIOLOGY OF AQUEOUS ENVIRONMENTS: INTERACTIONS, EFFECTS, AND HOMEOSTASIS. En Kumar Verma, D., MICROBIOLOGY FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE, SOIL HEALTH, AND ENVIRONMENTAL PROTECTION (pp. 341-389). Apple Academic Press Inc.

14. Patil, P., & Sarkar, A. (2022). Omics to field bioremediation. En Omics for Environmental Engineering and Microbiology Systems (pp. 1–17). CRC Press. DOI: 10.1201/9781003247883-1

15. Raj, A., & Kumar, A. (2022). Integrated omics approaches to understand and improve wastewater remediation. En Omics for Environmental Engineering and Microbiology Systems (pp. 113–142). CRC Press. DOI: 10.1201/9781003247883-6

16. Wani, A. K., Dhanjal, D. S., Akhtar, N., Chopra, C., Goyal, A., & Singh, R. (2022). Role of genomics, metagenomics, and other meta-omics approaches for expunging the environmental contaminants by bioremediation. En Omics for Environmental Engineering and Microbiology Systems (pp. 19–51). CRC Press. DOI: 10.1201/9781003247883-2.