

Bioaumentación: un aliado contra la contaminación

Bioaugmentation: an allied against pollution

Abigail Avila-Andrade , Ricardo Beristain-Cardoso 
Sergio Alcaraz-Ibarra , Boris Miguel López-Rebollar 
David García-Mondragón  & Gehovana González-Blanco* 

Resumen

La bioaumentación es una técnica biotecnológica innovadora en el campo de la biorremediación, consiste en la introducción de microorganismos específicos en ambientes contaminados para acelerar la degradación o eliminación de estos compuestos. Esta técnica es relevante y se considera sostenible porque aprovecha la capacidad natural de los microorganismos para degradar compuestos tóxicos que, de otro modo, persistirían en el ambiente durante décadas. Su eficacia radica en la selección de microorganismos altamente especializados y en su escalabilidad, ya que es una técnica que se puede llevar a cabo directamente en el sitio contaminado (in situ) o fuera de él (ex situ), lo que permite tener un mayor control del proceso. La bioaumentación ha sido clave en la descontaminación de derrames de petróleo en suelo y agua, la degradación de compuestos orgánicos tóxicos en aguas subterráneas, en el tratamiento de aguas residuales, entre otros. Bajo este contexto, el objetivo de este artículo es dar a conocer que el alcance de la bioaumentación, como se lleva a cabo y algunas aplicaciones.

Palabras clave: bioaumentación, biorremediación, microorganismos, degradación, contaminación ambiental.

Recibido: 31 de octubre de 2025.

Abstract

Bioaugmentation is an innovative biotechnological technique in the field of bioremediation, which consists of introducing specific microorganisms into contaminated environments to accelerate the degradation or elimination of these compounds. This technique is relevant because it takes advantage of the natural ability of microorganisms to degrade toxic compounds that would otherwise persist in the environment for decades, which makes it sustainable. Its effectiveness lies in the selection of highly specialized microorganisms and its scalability, since it is a technique that can be carried out directly at the contaminated site (in situ) or outside of it (ex situ), which allows for greater control of the process. Bioaugmentation has been key in the decontamination of oil spills in soil and water, the degradation of toxic organic compounds in groundwater, in the treatment of wastewater, among others. In this context, the objective of this article is to make known the scope of bioaugmentation, how it is carried out and some applications.

Key words: bioaugmentation, bioremediation, microorganisms, degradation, environmental pollution.

Aceptado: 23 de abril de 2026.

Introducción

La creciente preocupación por reducir los efectos negativos de la contaminación sobre los ecosistemas y gestionar de forma integral los residuos ha provocado el desarrollo de tecnologías y estrategias destinadas a eliminar o neutralizar contaminantes (Patel *et al.* 2022). Dentro de estas estrategias se encuentra la aplicación de métodos biológicos, que consiste

en el uso de plantas, microorganismos o sus enzimas (proteínas que facilitan la descomposición) para la degradación de los contaminantes (Agrawal *et al.* 2020, Nelson & Cox 2021).

A principios del siglo XX, científicos observaron que ciertos microorganismos podían degradar sustancias tóxicas en el ambiente. En 1938 el microbiólogo Claude E. Zobell, instructor de

microbiología marina en el Instituto Scripps de Oceanografía (SIO), demostró la capacidad de bacterias marinas para degradar hidrocarburos; posteriormente, en 1974 el investigador Richard Raymond obtuvo la primera patente por el empleo de microorganismos para la limpieza de acuíferos contaminados con gasolina, emitida en *SunOil Company Ambler*, Pensilvania (Cheffi *et al.* 2020). Estos estudios sentaron las bases para más investigaciones, y con los avances en la ingeniería genética se crearon microorganismos genéticamente modificados que tuvieran una mejor eficiencia en la degradación de contaminantes específicos. En el año 1971, el profesor en microbiología, Anand Mohan Chakrabarty, de la Universidad de Illinois, desarrolló un método de transferencia de genes modificando una bacteria (*Pseudomonas putida*) para tener una mayor capacidad de degradación de hidrocarburos (Pandey & Arora 2020). De esta manera, la biorremediación se consolidó como una estrategia para tratar la contaminación del ambiente.

Biorremediación

La biorremediación es una biotecnología que utiliza agentes biológicos para la degradación o conversión de contaminantes en formas menos tóxicas (Ayilara & Babalola 2023) que puede ser usada para limpiar o descontaminar suelos y cuerpos de agua, de manera sostenible y segura (Kumar *et al.* 2021, Nwankwegu *et al.* 2022, Patel *et al.* 2022). El proceso de biorremediación puede llevarse a cabo de dos maneras: *ex situ* e *in situ*.

La biorremediación *ex situ*, implica tomar el material contaminado del sitio y trasladarlo a un lugar diferente para llevar a cabo su tratamiento. Por ejemplo, el tratamiento de suelo contaminado con

hidrocarburos es dispuesto en montículos o contenedores de forma estructurada (biopilas o reactores) que permitan el desarrollo de microorganismos. En este proceso es común la adición de nutrientes, microorganismos y/o enzimas específicas con la finalidad de favorecer la degradación del contaminante presente en el suelo (Fig. 1A) (Thirumalaivasan *et al.* 2024).

La biorremediación *in situ*, es aquella que se lleva a cabo directamente en el sitio a tratar. Por ejemplo, el cultivo de plantas en áreas afectadas, con la finalidad de que las raíces absorban los contaminantes o bien, la adición de microorganismos vivos o sus enzimas en el sitio para promover la degradación (Fig. 1B) (Yaman 2020).

Las técnicas más aplicadas para la biorremediación de contaminantes tanto *ex situ* como *in situ* son: fitorremediación, biorremediación enzimática y biorremediación microbiana.

La fitorremediación se basa en el uso de plantas para absorber, acumular, degradar o estabilizar contaminantes en sus raíces y tejidos (Clemens & Ma 2016). No obstante, se requieren años de aplicación para observar los beneficios en el ambiente (Arantza *et al.* 2022). Un ejemplo, es el uso de árboles como el álamo que se ha utilizado para eliminar solventes clorados (tetracloruro de carbono, tricloroetileno o cloruro de vinilo) de agua subterránea, pero que tardan en crecer hasta 25 años (Malik & Goyal 2022)

La biorremediación enzimática consiste en el uso de enzimas (proteínas complejas), que se extraen de microorganismos, y que presentan una alta especificidad y eficiencia en la degradación del contaminante objetivo (Perera & Hemamali 2022). Un ejemplo, es el uso de la enzima lacasa, extraída de hongos (*Rhizoctonia praticola* y *Pleurotus ostreatus*) y que se ha utilizado





Figura 1. Biorremediación de suelo y agua: A) *ex situ*, B) *in situ* (Imagen creada parcialmente en Microsoft Designer).

para la degradación de compuestos fenólicos y tintes en aguas residuales (Okino-Delgado *et al.* 2019). Sin embargo, su aplicación a gran escala enfrenta desafíos importantes debido a los altos costos de producción y purificación de enzimas (Sosa-Martínez *et al.* 2022).

Finalmente, la biorremediación microbiana consiste en la adición de microorganismos como bacterias u hongos para transformar los contaminantes a través de su metabolismo (Napp *et al.* 2022). Actualmente, es la técnica más utilizada debido a que los microorganismos presentan una mayor capacidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales (Khan *et al.* 2024), además de tener un rápido crecimiento (minutos o horas) y mantener su actividad por largos periodos de tiempo, lo que contribuye a una remediación sostenida y aplicable a gran escala (Perera & Hemamali 2022). Un ejemplo de esta técnica es el uso de bacterias (*Pseudomonas mendoncina*, *Bacillus cereus*, *Bacillus cereus* y *Bacillus sphaericus*) para degradar hidrocarburos (Napp *et al.* 2022).

Técnicas de biorremediación microbiana

La bioestimulación y la bioaumentación son las técnicas de biorremediación microbiana más empleadas. En ambos casos se aprovecha la capacidad metabólica de los microorganismos para degradar los contaminantes en el ambiente.

La bioestimulación se basa en optimizar las condiciones del entorno, a través de la adición de nutrientes o la modificación de la temperatura y el pH, para favorecer el crecimiento y la actividad de los microorganismos nativos del sitio afectado (Sharma 2019). Mientras que, la bioaumentación implica la introducción de microorganismos específicos, seleccionados o diseñados para tener la capacidad de degradar ciertos contaminantes, complementando o reforzando la comunidad microbiana nativa (Zhang & Zhang 2022). Para aplicar la bioaumentación es necesario realizar estudios previos para introducir microorganismos que no desplacen a las especies nativas del sitio contaminado ya que esto podría acarrear problemas

como la pérdida de diversidad microbiana e interrumpir procesos esenciales en procesos de degradación y el ciclo de nutrientes.

Se ha demostrado que la bioaumentación puede ser más efectiva que la bioestimulación debido a que presenta una mayor tasa de degradación de compuestos tóxicos, especialmente en ambientes donde las poblaciones microbianas nativas no son suficientes o presentan deficiencias en la degradación del contaminante (Dehnavi & Ebrahimipour 2022). En la tabla I se presenta una comparación de estas metodologías.

Bioaumentación

La bioaumentación es una técnica avanzada de biorremediación que se basa en la introducción de microorganismos específicos en ambientes contaminados para mejorar la capacidad de degradación de contaminantes. Esta estrategia ha ganado importancia debido a su efectividad en la remediación de áreas afectadas por compuestos tóxicos que son difíciles de tratar mediante métodos convencionales. Los resultados obtenidos en diversas aplicaciones de bioaumentación han demostrado tasas de degradación significativamente superiores, incluso en condiciones ambientales adversas, lo que ha consolidado su uso en la limpieza de suelos, aguas y sedimentos contaminados (Dehnavi & Ebrahimipour 2022).

El proceso de bioaumentación comienza con el aislamiento (obtención), selección e identificación de microorganismos, estos normalmente son aislados de sitios contaminados o entornos extremos donde las condiciones fisicoquímicas son extremas: manantiales termales, fondo marino, desierto, etc. (Muter 2023).

El aislamiento es un proceso microbiológico que consiste en obtener microorganismos puros a partir de una muestra ambiental (porción o volumen de material presente en el sitio contaminado) la cual va a contener una mezcla de diferentes especies de microorganismos. Los pasos para obtener un aislado microbiano se muestran en la figura 2.

La selección de los microorganismos es un paso crítico, ya que deben ser compatibles con las condiciones ambientales del sitio contaminado y presentar una alta eficiencia en la degradación del contaminante objetivo (Nwankwegu *et al.* 2022). Los microorganismos utilizados en la bioaumentación pueden ser de origen nativo, exógeno o genéticamente modificado (Fig. 3) y su identificación puede realizarse a través de técnicas de biología molecular (secuenciación de ADN).

Los microorganismos nativos son aquellos que se encuentran de forma natural en el sitio a remediar y por consecuencia han adquirido un alto porcentaje de supervivencia y la capacidad de degradar el contaminante al que están expuestos (Varjani 2017). Los microorganismos exógenos pueden ser aislados de sitios diferentes al lugar a tratar. Deben presentar una alta capacidad para adaptarse y demostrar una buena actividad metabólica sobre el contaminante a eliminar (Ferraro *et al.* 2021).

Los microorganismos nativos son aquellos que se encuentran de forma natural en el sitio a remediar y por consecuencia han adquirido un alto porcentaje de supervivencia y la capacidad de degradar el contaminante al que están expuestos (Varjani 2017).

Los microorganismos exógenos pueden ser aislados de sitios diferentes al lugar



Tabla I. Ventajas y desventajas de la bioestimulación y bioaumentación.

Tipo de biorremediación microbiana	Ventajas	Desventajas
Bioestimulación	Es más económica que la bioaumentación, ya que no es necesaria la producción y mantenimiento de un cultivo microbiano.	La adición de nutrientes puede causar un desequilibrio en la comunidad microbiana y limitar el tratamiento de contaminantes más estables, al no contar con los microorganismos necesarios para su degradación (Gálvez 2020).
Bioaumentación	Al seleccionar los microorganismos más eficientes se mejoran las tasas de degradaciones específicas. Su aplicación puede realizarse en una amplia variedad de sitios.	El proceso de producción y mantenimiento del cultivo microbiano y transporte al sitio contaminado representa una inversión monetaria (Adams <i>et al.</i> 2015).

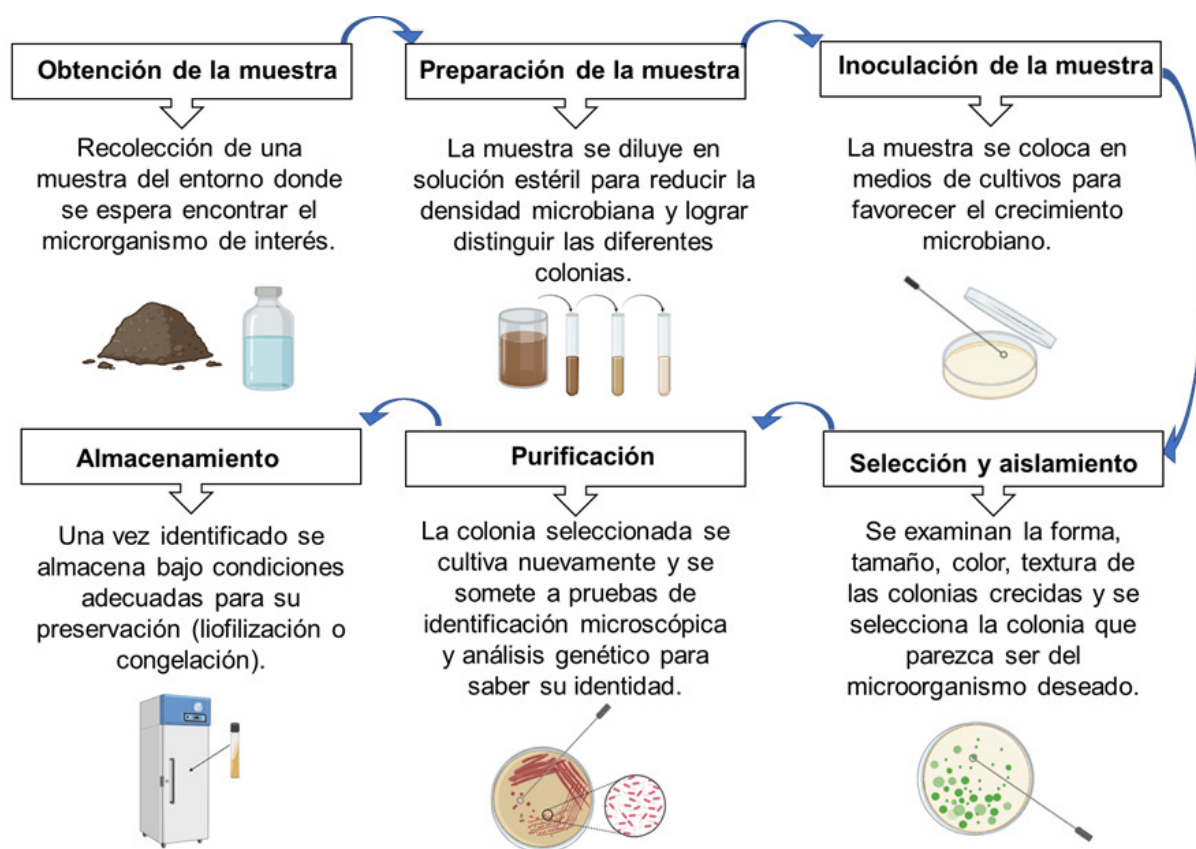


Figura 2. Pasos para un aislamiento microbiano (Imagen creada parcialmente en Microsoft Designer).

a tratar. Deben presentar una alta capacidad para adaptarse y demostrar una buena actividad metabólica sobre el contaminante a eliminar (Ferraro *et al.* 2021)

Finalmente, los microorganismos genéticamente modificados son los que han sido alterados a través de ingeniería genética

con la finalidad de mejorar la capacidad de degradación del contaminante a tratar (Rafeeq *et al.* 2023). Estos microorganismos son los que presentan una mayor eficiencia de degradación contaminantes, no obstante, su aplicación se limita a ser *ex situ* con la finalidad de controlar

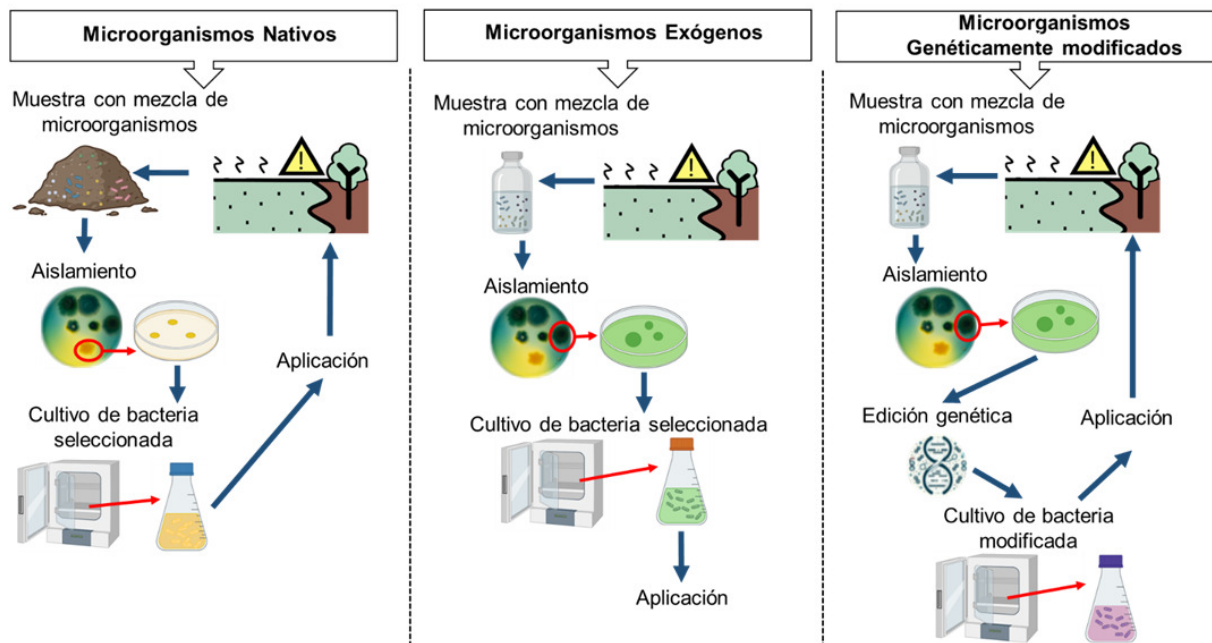


Figura 3. Tipo de microorganismos utilizados para la bioaumentación (Imagen creada parcialmente en Microsoft Designer)

alteraciones en la ecología microbiana en el ambiente. Sin embargo, por su costo es una tecnología limitada y que está en continuo desarrollo (Ahmad *et al.* 2023)

Una vez que los microorganismos han sido seleccionados para la bioaumentación, el siguiente paso es su cultivo y multiplicación en laboratorio. Este proceso tiene como objetivo aumentar la cantidad de microorganismos, mantener su viabilidad y capacidad de degradación para su aplicación efectiva en el sitio contaminado. Esto se logra mediante el control de diversas variables fisicoquímicas (temperatura, pH, concentración de nutrientes, etc.) en el medio a cultivar en el laboratorio. Frecuentemente, el medio de cultivo se suplementa con los compuestos contaminantes que se desean eliminar con la finalidad de que los microorganismos generen precursores (enzimas) para acelerar su degradación (Muter 2023).

Aplicación

La introducción de los microorganismos

cultivados al sitio afectado se realiza a través de diversos métodos: inyección directa, aplicación superficial, uso de biopelículas y encapsulación, según las características del sitio y el tipo de contaminante (Al-Amshawee *et al.* 2020).

La técnica de inyección directa consiste en la introducción de una suspensión concentrada de microorganismos en el subsuelo o en sitios no superficiales. La aplicación superficial, radica como su nombre lo indica, en aplicar superficialmente una suspensión microbiana permitiendo que los microorganismos se infiltren de manera natural (Gogoi *et al.* 2023). Ambas técnicas pueden utilizar microorganismos aislados o consorcios microbianos y estar presentes en el material contaminado, especialmente en procesos como la biorremediación de residuos sólidos (Al-Amshawee *et al.* 2020).

Los cuerpos de agua contaminados, como ríos, lagos o acuíferos, presentan retos como la dispersión rápida de los microorganismos y la dilución de nutrientes



esenciales. Para mitigar estos problemas, se emplean biopelículas o portadores sólidos que facilitan la colonización y concentración de los microorganismos en el sitio contaminado (Al-Amshawee *et al.* 2020).

También, se utilizan técnicas avanzadas como la encapsulación o la inmovilización de microorganismos para protegerlos de condiciones adversas en el sitio (Muter 2023). La encapsulación consiste en formar una mezcla de los microorganismos seleccionados con un material (alginato de calcio, agarosa, poliacrilamida), con la finalidad de formar esferas que brinden protección a los microorganismos de la toxicidad de los contaminantes. Por otro lado, la inmovilización consiste en la fijación de los microorganismos en soportes sólidos (matriz de alginato de calcio, celulosa o agar, zeolita, silicatos), facilitando su aplicación en campo y prolongando su actividad al mantenerlos concentrados en el área de interés, mejorando su manejo y aplicación en el sitio (Muter 2023).

Finalmente es importante mencionar que, para asegurar el éxito de la bioaumentación, es esencial ajustar y monitorear el desarrollo del proceso en términos de variables fisicoquímicas como humedad, oxígeno disponible, pH, nutrientes, etc., con el objetivo de no causar un desequilibrio ecológico que favorezca el desarrollo de microorganismos no deseados. (Al-Amshawee *et al.* 2020).

De igual forma, se debe llevar a cabo el monitoreo continuo del sitio tras la introducción de los microorganismos. Esto se realiza a través de la evaluación de la disminución de contaminantes mediante técnicas analíticas y del seguimiento de la actividad microbiana a través de técnicas de biología molecular, como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) cuantitativa o la secuenciación metagenómica, que permiten evaluar

la dinámica de la comunidad microbiana en el sitio (Brumfield *et al.* 2021).

Conclusiones

La biorremediación microbiana, especialmente a través de la técnica de bioaumentación, ha demostrado ser una estrategia eficaz y adaptable para la degradación de contaminantes en diversos entornos. Los microorganismos se destacan por su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y por su rápido crecimiento, lo que facilita una remediación sostenida y potencialmente escalable.

La bioaumentación permite introducir microorganismos seleccionados o diseñados específicamente para abordar contaminantes difíciles de degradar donde las poblaciones microbianas nativas no son suficientes o no poseen la capacidad de degradación requerida. Este proceso involucra una cuidadosa selección y cultivo de microorganismos específicos, que pueden ser nativos, exógenos o genéticamente modificados, y cuyo éxito depende de la compatibilidad con las condiciones ambientales del sitio contaminado.

La implementación de técnicas avanzadas como la encapsulación e inmovilización de microorganismos, junto con un monitoreo continuo del sitio para ajustar las condiciones y estrategias de manejo, son elementos clave para maximizar la eficiencia del proceso y lograr la remediación exitosa del área afectada.

Referencias

- Adams, G.O., P.T. Fufeyin, S.E. Okoro & I. Ehinomen. 2015. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation* 3(1): 28-39.
- Agrawal, K., A. Bhatt, V. Chaturvedi & P. Verma. 2020. Bioremediation: an effective technology

toward a sustainable environment via the remediation of emerging environmental pollutants. *Emerging Technologies in Environmental Bioremediation*: 165-196.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819860-5.00007-9>

- Ahmad, A., G. Mustafa, A. Rana & A.R. Zia. 2023.** Improvements in bioremediation agents and their modified strains in mediating environmental pollution. *Current Microbiology* 80(6): 208.
- Al-Amshawee, S., M.Y.B.M. Yunus, D.V.N. Vo & N.H. Tran. 2020.** Biocarriers for biofilm immobilization in wastewater treatments: a review. *Environmental Chemistry Letters* 18: 1925-1945.
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01049-y>
- Arantza, S.J., M.R. Hiram, K. Erika, M.N. Chávez-Avilés, J.I. Valiente-Banuet & G. Fierros-Romero. 2022.** Bio- and phytoremediation: Plants and microbes to the rescue of heavy metal polluted soils. *SN Applied Sciences* 4(2): 59.
<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04911-y>
- Ayilara, M.S. & O.O. Babalola. 2023.** Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy* 5: 1183691.
<https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>
- Brumfield, K.D., J.A. Cotruvo, O.C. Shanks, M. Sivaganesan, J. Hey, N.A. Hasan & M.B. Leddy. 2021.** Metagenomic sequencing and quantitative real-time PCR for fecal pollution assessment in an urban watershed. *Frontiers in Water* 3: 626849.
<https://doi.org/10.3389/frwa.2021.626849>
- Clemens, S. & J.F. Ma. 2016.** Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology* 67(1): 489-512.
- Cheffi, M., D. Hentati, A. Chebbi, N. Mhiri, S. Sayadi, A.M. Marqués & M. Chamkha. 2020.** Isolation and characterization of a newly naphthalene-degrading *Halomonas pacifica* strain Cnaph3. *3 Biotech* 10: 1-15.
<https://doi.org/10.1007/s13205-020-2085-x>
- Dehnavi, S.M. & G. Ebrahimipour. 2022.** Comparative remediation rate of biostimulation, bioaugmentation and phytoremediation in hydrocarbon contaminants. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19(11): 11561-11586.
- Ferraro, A., G. Massini, V.M. Miritana, A. Panico, L. Pontoni, M. Race, S. Rosa, A. Signorini, M. Fabbicino & F. Pirozzi. 2021.** Bioaugmentation strategy to enhance polycyclic aromatic hydrocarbons anaerobic biodegradation in contaminated soils. *Chemosphere* 275: 130091.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130091>
- Gálvez, E.C. 2020.** Analysis of the impact of organic pollutants on marine microbial communities. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- Gogoi, B.K., N.N. Dutta, P. Goswami & T.K. Mohan. 2003.** A case study of bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Advances in Environmental Research* 7(4): 767-782.
[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00029-1)
- Khan, A., I. Asif, R. Abid, S. Ghazanfar, W. Ajmal, A.M. Shehata & M.A.E. Naiel. 2024.** The sustainable approach of microbial bioremediation of arsenic. *International Journal of Environmental Science and Technology* 21: 7849-7864.
<https://doi.org/10.1007/s13762-024-05594-9>
- Kumar, A., A. Sharma, P. Chaudhary & S. Gangola. 2021.** Chlorpyrifos degradation using binary fungal strains isolated from industrial waste soil. *Biologia* 76(10): 3071-3080.
<https://doi.org/10.1007/s11756-021-00816-8>
- Malik, J.A. & M.R. Goyal (eds.). 2022.** Bioremediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management. CRC Press.
- Muter, O. 2023.** Current trends in bioaugmentation tools for bioremediation. *Microorganisms* 11(3): 710.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11030710>
- Napp, A.P., S.R. Allebrandt, J.E.S. Pereira, R.S.A. Streit, F. Bucker, S. Mitidieri & M.H. Vainstein. 2022.** Scale-up treatment of petroleum hydrocarbon-contaminated soil using a microbial consortium. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19(7): 6023-6032.
<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03467-z>
- Nelson, D.L. & M.M. Cox. 2021. *Lehninger Principles of Biochemistry*. W.H. Freeman.
- Nwankwegu, A.S., L. Zhang, D. Xie, C.O. Onwosi, W.I. Muhammad, C.K. Odoh & J.N. Idenyi. 2022.** Bioaugmentation as a green technology for hydrocarbon pollution remediation. *Journal of Environmental Management* 304: 114313.



- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114313>
- Okino-Delgado, C.H., M.R. Zanutto-Elgui, D.Z. do Prado, M.S. Pereira & L.F. Fleuri. 2019.** Enzymatic bioremediation: current status and applications. In: *Microbial Metabolism of Xenobiotic Compounds*: 79-101.
- https://doi.org/10.1007/978-981-13-7462-3_4
- Pandey, P. & N.K. Arora. 2020.** Prof. Ananda Mohan Chakrabarty: The Superbug superhero. *Environmental Sustainability* 3: 333-335.
- <https://doi.org/10.1007/s42398-020-00117-x>
- Patel, A.K., R.R. Singhania, F.P.J.B. Albarico, A. Pandey, C.W. Chen & C.D. Dong. 2022.** Organic wastes bioremediation and its changing prospects. *Science of the Total Environment* 824: 153889.
- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153889>
- Perera, I.C. & E.H. Hemamali. 2022.** Genetically modified organisms for bioremediation. In: *Bioremediation of Environmental Pollutants*: 163-186.
- https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8_7
- Rafeeq, H., N. Afsheen, S. Rafique, A. Arshad, M. Intisar, A. Hussain & H.M. Iqbal. 2023.** Genetically engineered microorganisms for environmental remediation. *Chemosphere* 310: 136751.
- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136751>
- Sharma, J. 2019.** Advantages and limitations of in situ methods of bioremediation. *Recent Advances in Biology and Medicine* 5: 10941.
- Sosa-Martínez, J., N. Balagurusamy, S.K. Gadi, J. Montañez, J.R. Benavente-Valdés & L. Morales-Oyervides. 2022.** Critical process parameters and optimization strategies for enhanced bioremediation. In: *Bioremediation of Environmental Pollutants*: 75-110.
- https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8_4
- Thirumalaivasan, N., L. Gnanasekaran, S. Kumar, R. Durvasulu, T. Sundaram, S. Rajendran, S. Nangan & K. Kanagaraj. 2024.** Utilization of fungal and bacterial bioremediation techniques. *Frontiers in Materials* 11: 1416445.
- <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1416445>
- Varjani, S.J. 2017.** Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology* 223: 277-286.
- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Yaman, C. 2020.** Performance and kinetics of bioaugmentation, biostimulation and natural attenuation. *Processes* 8(8): 883.
- <https://doi.org/10.3390/pr8080883>
- Zhang, T. & H. Zhang. 2022.** Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Microorganisms* 10: 261.
- <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020261>