



BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL Y SOCIEDAD: APLICACIONES, IMPACTOS ÉTICOS Y PERSPECTIVAS PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE.

ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY AND SOCIETY: APPLICATIONS, ETHICAL IMPACTS AND PERSPECTIVES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT.

Ricardo Ortiz¹ , Julio Alfonso¹, Dante Peña¹, Laura Baez¹, María José Yegros¹, Rebeca Prieto¹ , Shaun McGahan¹ 

¹Universidad San Lorenzo, Facultad de Ciencias de la Salud y el Deporte, Sede Central.

RESUMEN

La biotecnología ambiental representa una herramienta clave para abordar los desafíos contemporáneos de contaminación, cambio climático y agotamiento de recursos, mediante el uso de organismos vivos y sus derivados para la remediación, monitoreo y generación de bioproductos sostenibles. Este artículo de revisión integra evidencia científica reciente de artículos indexados y tesis de posgrado, analizando las aplicaciones técnicas (biorremediación microbiana y fitorremediación, celdas de combustible microbianas, herramientas ómicas y tecnologías híbridas), los impactos ambientales positivos y los aspectos sociales, éticos y económicos asociados. Se examinan casos en América Latina, donde la biorremediación de hidrocarburos y metales pesados ha demostrado reducciones de hasta el 98% en contaminantes, junto con el fortalecimiento de la agricultura sustentable mediante biofertilizantes y control biológico. Sin embargo, persisten desafíos éticos relacionados con la percepción pública de organismos genéticamente modificados (OGM), equidad en el acceso a tecnologías, biopiratería y riesgos de alteración ecosistémica irreversible. La integración de bioeconomía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU ofrece un marco para equilibrar innovación y justicia social. Se concluye que la biotecnología ambiental, cuando se desarrolla con gobernanza inclusiva y evaluación de ciclo de vida, puede contribuir significativamente a la transición hacia sociedades sostenibles, aunque requiere mayor inversión en investigación interdisciplinaria y participación ciudadana.

Palabras clave: Biotecnología ambiental, biorremediación, fitorremediación, bioeconomía, impacto social, sostenibilidad.

ABSTRACT

Environmental biotechnology represents a key tool for addressing contemporary challenges such as pollution, climate change, and resource depletion. It utilizes living organisms and their derivatives for remediation, monitoring, and the generation of sustainable bioproducts. This review article integrates recent scientific evidence from indexed articles and graduate theses, analyzing technical applications (microbial and phytoremediation, microbial fuel cells, omics tools, and hybrid technologies), positive environmental impacts, and associated social, ethical, and economic aspects. Case studies in Latin America are examined, where the bioremediation of hydrocarbons and heavy metals has demonstrated reductions of up to 98% in pollutants, along with the strengthening of sustainable agriculture through biofertilizers and biological control. However, ethical challenges persist, including public perception of genetically modified organisms (GMOs), equitable access to technologies, biopiracy, and the risk of irreversible ecosystem alteration. Integrating the bioeconomy with the UN Sustainable Development Goals (SDGs) provides a framework for balancing innovation and social justice. It is concluded that environmental biotechnology, when developed with inclusive governance and life cycle assessment, can significantly contribute to the transition to sustainable societies, although it requires greater investment in interdisciplinary research and citizen participation.

Keywords: Environmental biotechnology, bioremediation, phytoremediation, bioeconomy, biotechnology ethics, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

La biotecnología ambiental se define como la aplicación de sistemas biológicos, microorganismos, plantas, algas, enzimas y sus derivados para la prevención, monitoreo, remediación de contaminantes ambientales y la generación de bioproductos y energía limpia, integrando principios de ecología, microbiología, ingeniería genética y herramientas moleculares (1,2). Esta disciplina surge como respuesta estratégica a la crisis ambiental global generada por la actividad antrópica intensiva, que incluye contaminación por hidrocarburos, metales pesados, plásticos persistentes y compuestos orgánicos recalcitrantes, los cuales comprometen la calidad del suelo, el agua y el aire, afectando directamente la salud humana, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos esenciales (3). A diferencia de los métodos físico-químicos convencionales, excavación, incineración o lavado químico, que implican altos costos económicos, generación de residuos secundarios tóxicos y emisiones adicionales, los enfoques biotecnológicos aprovechan procesos naturales como biodegradación, biosorción, bioacumulación y fitoextracción, ofreciendo soluciones más sostenibles, económicamente viables y con menor huella ecológica (4).

En América Latina, la biotecnología ambiental adquiere una relevancia particular debido a la intensa actividad extractiva y agroindustrial. Países como Ecuador, Colombia, México y Venezuela enfrentan derrames recurrentes de hidrocarburos en ecosistemas sensibles como la Amazonía y manglares, así como acumulación de metales pesados (plomo, cadmio, mercurio y arsénico) derivados de

la minería ilegal y formal, que afectan suelos agrícolas, cuerpos de agua y comunidades locales (1,5). Estos impactos no solo degradan la biodiversidad, sino que también amenazan la soberanía alimentaria y la salud de poblaciones vulnerables, exacerbados por el cambio climático y la deforestación acelerada. Latinoamérica alberga cerca del 40% de la biodiversidad mundial (6). Estudios regionales destacan que la biorremediación microbiana y la fitorremediación con especies nativas han logrado reducciones de contaminantes entre el 60% y 98% en suelos y aguas tropicales, con costos significativamente inferiores a los métodos tradicionales y beneficios adicionales como la restauración de ecosistemas y la producción de bioproductos (2,7). Además, esta disciplina impulsa la bioeconomía circular mediante la valorización de residuos agroindustriales para generar biofertilizantes, biocombustibles, bioplásticos y biomateriales, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, especialmente los ODS 2 (hambre cero), 6 (agua limpia y saneamiento), 7 (energía asequible y no contaminante), 12 (producción y consumo responsables), 13 (acción por el clima) y 15 (vida de ecosistemas terrestres) (8).

No obstante, la biotecnología ambiental trasciende el ámbito estrictamente técnico y plantea profundos desafíos sociales y éticos que deben ser abordados de manera interdisciplinaria. Su implementación genera interrogantes sobre la percepción pública de organismos genéticamente modificados (OGM) utilizados en biorremediación, el riesgo de escape genético a ecosistemas naturales,

posibles alteraciones irreversibles de la biodiversidad y la equidad en la distribución de beneficios y riesgos (9). En contextos latinoamericanos ricos en megadiversidad, surgen preocupaciones adicionales relacionadas con la biopiratería, la concentración de patentes en manos de corporaciones transnacionales y la protección del conocimiento tradicional de comunidades indígenas y campesinas, que históricamente han gestionado recursos biológicos de forma sostenible (10). Análisis desde la perspectiva de ciencia, tecnología y sociedad (CTS) revelan que la falta de deliberación pública, alfabetización científica y participación ciudadana puede generar resistencias culturales, conflictos socioambientales y desconfianza hacia las innovaciones biotecnológicas (11). La bioética ambiental, fundamentada en principios de autonomía, beneficencia, no maleficencia, justicia distributiva y precaución, resulta indispensable para evaluar los impactos intergeneracionales y garantizar que los avances científicos no profundicen desigualdades existentes ni vulneren derechos humanos y colectivos (12).

Esta revisión bibliográfica sistemática tiene como propósito sintetizar el estado del arte de la biotecnología ambiental, integrando sus aplicaciones técnicas –biorremediación microbiana y fitorremediación con especies nativas, herramientas ómicas (metagenómica, transcriptómica y metabolómica), celdas de combustible microbianas y tecnologías híbridas– con las dimensiones sociales, éticas y económicas asociadas (1,2, 13). El objetivo no se limita a presentar evidencias de eficacia técnica, sino también a examinar cómo estas innovaciones interactúan con la sociedad, promoviendo

o desafiando principios de equidad, soberanía alimentaria, justicia ambiental y sostenibilidad inclusiva, como la degradación eficiente de hidrocarburos por consorcios microbianos o la fitorremediación con plantas hiperacumuladoras en gleysoles contaminados (14).

La estructura del artículo comprende los fundamentos conceptuales e históricos de la biotecnología ambiental, las aplicaciones técnicas detalladas en contextos terrestres, acuáticos y agrícolas, las dimensiones sociales y éticas (percepción pública, biopiratería, equidad y principio de precaución), los desafíos técnicos, regulatorios y socioeconómicos identificados en América Latina, los casos de estudio más relevantes, las perspectivas futuras que incorporan inteligencia artificial, nanobiorremediación y marcos de gobernanza multipartita, y las conclusiones con recomendaciones políticas. En última instancia, esta revisión subraya que el verdadero potencial de la biotecnología ambiental para contribuir a un desarrollo sostenible solo se materializará si se equilibra el avance científico con una gobernanza inclusiva, transparente y ética, que respete los límites planetarios, proteja la diversidad biológica y cultural, y garantice que los beneficios se distribuyan de manera justa entre las generaciones presentes y futuras (15).

2. DESARROLLO

2.1. Fundamentos conceptuales e históricos de la biotecnología ambiental

La biotecnología ambiental tiene raíces en prácticas ancestrales de fermentación y compostaje, pero se

consolidó como disciplina científica en el siglo XX con los avances en microbiología y genética molecular (1). Se define como el uso de organismos vivos o sus componentes para alterar materiales con fines ambientales y productivos sostenibles (16).

Conceptualmente, abarca procesos como biorremediación (in situ o ex situ), bioaumentación (inoculación de microorganismos especializados), bioestimulación (adición de nutrientes) y fitorremediación (uso de plantas y su rizósfera) (17). Las herramientas ómicas (metagenómica, transcriptómica y metabolómica) permiten identificar genes y vías metabólicas en comunidades microbianas complejas, optimizando consorcios para la degradación de contaminantes (18).

En América Latina, un análisis bibliométrico muestra un crecimiento sostenido de publicaciones sobre biorremediación de hidrocarburos y metales pesados, con énfasis en estudios de campo en Ecuador, México y Colombia (19,20). Estas investigaciones destacan el potencial de microorganismos autóctonos y plantas nativas adaptadas a condiciones tropicales (21).

2.2. Aplicaciones técnicas en el ámbito ambiental

a. Biorremediación microbiana y tecnologías híbridas

Los microorganismos, como bacterias del género *Pseudomonas* y hongos del género *Pleurotus* y *Trichoderma*, degradan contaminantes orgánicos mediante enzimas específicas (22). Estudios en Colombia han demostrado que la combinación de bioaumentación y bioestimulación con

surfactantes no iónicos logra remociones de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) superiores al 80% en suelos contaminados con fluidos de perforación (23).

Las celdas de combustible microbianas (MFC) representan una tecnología híbrida que trata aguas residuales mientras genera bioelectricidad a partir de la oxidación microbiana de materia orgánica (24). Aunque enfrentan limitaciones de escalabilidad y eficiencia energética, su potencial dual (biorremediación + energía renovable) las posiciona como una opción prometedora en contextos latinoamericanos (25). Tecnologías combinadas, como electro-biorremediación, mejoran la biodegradabilidad de compuestos refractarios (26).

b. Fitorremediación y monitoreo biotecnológico

La fitorremediación utiliza plantas hiperacumuladoras o tolerantes para extraer, estabilizar o degradar contaminantes. En Latinoamérica, especies como *Leersia hexandra*, *Brachiaria brizantha* y *Eichhornia crassipes* han mostrado eficiencias de remoción de hidrocarburos y metales pesados entre 60-87% en suelos y aguas contaminadas (17,27). Una tesis de especialización analizó su aplicación en Colombia y otros países, destacando el potencial de plantas nativas para metales como mercurio, plomo y cromo (21).

Los biosensores basados en microorganismos o enzimas, integrados con nanotecnología, permiten el monitoreo en tiempo real de contaminantes emergentes (18).

c. Bioenergía, bioplásticos y agricultura sustentable

Microalgas y residuos agroindustriales se utilizan para producir biocombustibles y bioplásticos (ácido poliláctico o polihidroxialcanoatos). En la agricultura, biofertilizantes (*Azotobacter*, *Rhizobium*) y agentes de control biológico (*Bacillus thuringiensis*, *Trichoderma* spp.) reducen el uso de agroquímicos sintéticos, promoviendo sistemas más sostenibles (5). Estudios en Colombia reportan mejoras significativas en el crecimiento de cultivos como maracuyá mediante inoculantes fúngicos (28).

2.3. Dimensiones sociales, éticas y económicas

La biotecnología ambiental genera impactos positivos como la creación de empleo rural y la reducción de la contaminación, pero también plantea riesgos de dependencia tecnológica y biopiratería en países ricos en biodiversidad (8). La percepción pública en América Latina muestra frecuentemente desconfianza hacia organismos genéticamente modificados debido a la falta de información y temores de alteración ecosistémica irreversible (21).

Desde la perspectiva ética, se debe aplicar el principio de precaución ante posibles efectos intergeneracionales y la pérdida de biodiversidad (10). La justicia ambiental exige equidad en la distribución de beneficios y costos, incluyendo la protección del conocimiento tradicional indígena (29).

Económicamente, la biorremediación resulta más barata que métodos convencionales en muchos casos, y la bioeconomía circular alinea la innovación con los ODS, fomentando

inclusión social y descarbonización (23,24). Sin embargo, persisten brechas en inversión en ciencia y tecnología y marcos regulatorios armonizados (30).

2.4. Desafíos, casos de estudio y perspectivas futuras

Entre los desafíos técnicos destacan la variabilidad de las matrices ambientales, la escalabilidad de las MFC y los costos de las herramientas ómicas (22). Socialmente, la brecha digital y la resistencia cultural limitan la adopción (31).

Casos destacados incluyen la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia mediante consorcios microbianos y enmiendas orgánicas, con eficiencias superiores al 90% en algunos tratamientos (23,6). En Ecuador y México, la fitorremediación combinada con microorganismos ha mostrado resultados prometedores en sitios impactados por extracción petrolera (17,21).

Las perspectivas futuras apuntan a la integración de inteligencia artificial y metagenómica para el diseño racional de enzimas y consorcios, la nanobiorremediación y el desarrollo de bioeconomías circulares con gobernanza multipartita y evaluación de ciclo de vida completa (32,33).

4. CONCLUSIÓN

La biotecnología ambiental constituye un pilar fundamental para la sostenibilidad, ofreciendo soluciones integradas que abordan simultáneamente la remediación ambiental, la generación de energía limpia y la producción responsable de bioproductos (1,32). Su éxito depende de equilibrar los avances técnicos con

consideraciones sociales y éticas, garantizando equidad, transparencia y participación ciudadana activa (22).

En América Latina, donde los desafíos ambientales derivados de actividades extractivas y agrícolas son agudos, resulta esencial aumentar la inversión en investigación local, formación de posgrado y políticas públicas inclusivas (29,24). Las futuras investigaciones deben priorizar enfoques interdisciplinarios que vinculen firmemente la ciencia con la sociedad, promoviendo una bioeconomía que respete los límites planetarios y fomente la justicia intergeneracional (30). Solo mediante este enfoque holístico la biotecnología ambiental cumplirá su promesa de contribuir a un futuro más limpio y equitativo para la región y el planeta.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chicaiza-Ortiz CD, Rivadeneira-Arias VC, Herrera-Feijoo RJ, Andrade JC. *Biotecnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. Santo Domingo: Editorial Grupo AEA; 2023.
2. Hernández-Macedo ML, López JA, Barrios Eguiluz KI, Salazar-Banda GR. Environmental Biotechnology: Challenges and perspectives in applying combined technologies to enhance remediation and renewable energy generation. *Rev Peru Biol*. 2020;27(1):43-48.
3. Bécares Mantecón E. Biotecnología Ambiental, ¿la cenicienta de la Biotecnología? *AmbioCiencias*. 2018;(12):81-94.
4. Olguín EJ. Contaminación de manglares por hidrocarburos y biorremediación. *Rev Int Contam Ambient*. 2007;23(3):139-150.
5. Cubides C, Gutiérrez-Cortés C, Suarez H. Bioprospecting in food production: an approximation of the current state in Colombia. *Rev Fac Nac Agron Medellín*. 2023;76(1):10227-10246.
6. Velásquez TDM. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Estudios Ambientales*. 2024.
7. CEPAL/FAO/IICA. *La bioeconomía: potenciando el desarrollo sostenible de la agricultura y los territorios rurales en ALC*. San José: IICA; 2019.
8. Moreno Muñoz M. *Biotechnología, ética y sociedad*. Granada: Universidad de Granada; 2024.
9. Bota Arqué AB. El impacto de la biotecnología en América Latina: espacios de participación social. *Acta Bioeth*. 2003;9(1):21-32.
10. Rodríguez Yunta E. Desafíos éticos en investigación genómica y biotecnología. *Acta Bioeth*. 2020;26(2):137-148.
11. Vargas-Hernández JG. *Bioeconomía en la encrucijada del desarrollo sostenible*. 2018.
12. Hlihor RM, et al. Bioremediation: An Overview on Current Practices, Advances, and New Perspectives in Environmental Pollution Treatment. *J Environ Public Health*. 2017;2017:6327610.
13. Dutta K, et al. New Trends in Bioremediation Technologies Toward Environment-Friendly Society: A Mini-Review. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:666858.
14. Ferrinho P, et al. Developing One Health systems: A central role for the

- One Health workforce. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(6):4704.
15. Leiva A, et al. Impact of Biotechnology on Sustainable Development. *Sustainability*. 2025;17(22):10023.
 16. Hernández-Macedo ML, López JA, Barrios Eguiluz KI, Salazar-Banda GR. Environmental Biotechnology: Challenges and perspectives in applying combined technologies. *Rev Peru Biol*. 2020;27(1):43-48.
 17. Peña-Castro JM, et al. Bases moleculares de la fitorremediación de hidrocarburos de petróleo. *Rev Mex Biodivers*. 2006.
 18. Cervantes MAG, et al. Biotecnología y Sustentabilidad. *Rev Biotecnol Sustent*. 2024.
 19. Velásquez TDM. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos en Latinoamérica: revisión entre 2010-2023. *Estudios Ambientales*. 2024.
 20. Infante C, et al. Criterios y tecnologías de remediación en suelos contaminados con hidrocarburos. 2020.
 21. Correa MVG. Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados. *Cienc Latina*. 2025.
 22. Vizúete-García RA, et al. Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Rev Lasallista Investig*. 2020;17
 23. Martínez-Rivera A, et al. Oil bioremediation in soils contaminated with oil spills from drilling fluids in Ecuador, Mexico and Colombia. *An Acad Bras Cienc*. 2021;93(Suppl 3):e2020150
 24. Guadarrama-Pérez O, et al. Celdas de combustible microbianas: una evolución sustentable en la producción de bioelectricidad. *AyT BUAP*. 2025;10(39):31-49
 25. Montoya-Vallejo C, et al. Microalgal Microbial Fuel Cells: A Comprehensive Review. *Appl Sci*. 2025;15(6):3335.
 26. Peña Murillo SE, et al. Evaluación comparativa de métodos de biorremediación y electroremediación. *Rev Iberoam Educ*. 2025;9(1):95-112
 27. Suárez R. Fitorremediación: una alternativa para reducir la contaminación por hidrocarburos en Ecuador. 2021.
 28. Falcones-Molina EL, et al. Biotecnología y sostenibilidad alimentaria en proyectos de educación superior. *Yachasun*. 2024;8(15):e0541.
 29. Rodríguez M, Mondaini G, Hirschfeld M. Hacia una bioeconomía sostenible en América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL; 2019.
 30. Correa-Mahecha F, Mendoza-Geney L, Martín-Alvarado H. Bioeconomía y desarrollo sostenible. Prospectivas y realidades de sus aplicaciones e impacto socioambiental. Bogotá: Editorial Universidad de América; 2022.
 31. Yunta ER. Reflexión bioética sobre el uso de organismos genéticamente modificados. *Acta Bioeth*. 2010;16(2)
 32. CEPAL/FAO/IICA. La bioeconomía: potenciando el desarrollo sostenible de la agricultura y los territorios rurales en ALC. San José: IICA; 2019.
 33. Dell' Anno F, et al. Bacteria, Fungi and Microalgae for the Bioremediation of Marine Sediments Contaminated by Petroleum Hydrocarbons in the Omics Era. *Microorganisms*. 2021;9(8):1695.
 34. Bisang R, Regúnaga M. La bioeconomía como estrategia para fortalecer la integración del Mercosur. San José: IICA; 2022.