Biotecnología: Una visión integral de su evolución y aplicaciones

Biotechnology: A Comprehensive Overview of Its Evolution and Applications

Recepción del artículo: 20/06/2025 • Aceptación para publicación: 23/08/2025 • Publicación: 01/09/2025

Maria Guadalupe-Rodriguez Vidarte[1]
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6676-5346
Essa Emiret-Pacheco Reyes[1]
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7460-5907
Martha Catalina Bernal Ramírez[3]
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9048-3611
Mariana Díaz-Zaragoza[2]
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7427-5865
Omar Graciano-Machuca[2,3,*]
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2328-796X

[1]Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de los Valles. Ingeniería en Sistemas Biológicos. Guadalajara, Jalisco, México.
[2]Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de los Valles. Departamento de Ciencias de la Salud. Laboratorio de Sistemas Biológicos. Guadalajara, Jalisco, México.
[3]Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de los Valles. Departamento de Ciencias Computacionales e Ingenierías. Centro de Investigación en Procesamiento Digital de Señales. Guadalajara, Jalisco, México.

*Autor para correspondencia:
omargmachuca@academicos.udg.mx

Resumen

Este trabajo ofrece una visión integral de la evolución histórica y las aplicaciones contemporáneas de la biotecnología, destacando su carácter interdisciplinario y su impacto en diversos sectores clave. Se analizan los antecedentes empíricos de esta disciplina desde la antigüedad hasta las innovaciones actuales como la edición génica mediante CRISPR-Cas9 y el empleo de inteligencia artificial en procesos biotecnológicos. Se propone una clasificación cromática que distingue las distintas ramas de la biotecnología según su campo de aplicación: roja (salud humana), verde (agrícola), blanca (industrial), gris (medioambiental), azul (marina), amarilla (alimentos), dorada (bioinformática), violeta (ética y bioseguridad), marrón (ecosistemas áridos), negra (bioterrorismo) y naranja (educación y divulgación). Esta taxonomía facilita la comprensión de su alcance y promueve el análisis de sus implicaciones científicas, sociales y éticas. Asimismo, se abordan los desafíos asociados a su desarrollo y adopción, incluyendo las controversias bioéticas, los marcos regulatorios y las variaciones culturales en su aceptación. El manuscrito destaca el papel fundamental de la biotecnología como herramienta para enfrentar retos globales como el cambio climático, la seguridad alimentaria, la salud pública y la sustentabilidad ambiental, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En conjunto, el documento constituye una referencia útil para investigadores, docentes y profesionales interesados en comprender la amplitud, profundidad e impacto de la biotecnología en el mundo contemporáneo.

Palabras clave: Fermentación, ingeniería genética, organismo genéticamente modificado.

Abstract

This work presents a comprehensive overview of the historical evolution and contemporary applications of biotechnology, emphasizing its interdisciplinary nature and impact across multiple key sectors. It explores the empirical origins of the field, from ancient practices to current innovations such as gene editing through CRISPR-Cas9 and the integration of artificial intelligence in biotechnological processes. A chromatic classification is proposed to distinguish the various branches of biotechnology based on their fields of application: red (human health), green (agriculture), white (industrial), grey (environmental), blue (marine), yellow (food), gold (bioinformatics), violet (ethics and biosafety), brown (arid ecosystems), black (bioterrorism), and orange (education and outreach). This taxonomy enhances the understanding of biotechnology's scope and fosters critical analysis of its scientific, social, and ethical implications. The manuscript also addresses challenges related to its development and adoption, including bioethical controversies, regulatory frameworks, and cultural variations in public acceptance. It highlights the fundamental role of biotechnology in tackling global challenges such as climate change, food security, public health, and environmental sustainability, aligning with the Sustainable Development Goals. Altogether, the document serves as a valuable reference for researchers, educators, and professionals seeking to understand the breadth, depth, and global impact of biotechnology in the modern era.

Keywords: Biotechnology, fermentation, genetic engineering, genetic modified organism.

"Si alguna vez has disfrutado de un trozo de queso, una copa de vino, has preparado pan o incluso te has vacunado contra la COVID-19, entonces ya has sido testigo de los beneficios de la biotecnología".

Introducción

La biotecnología es un campo multidisciplinario que emplea las propiedades y procesos biológicos de los seres vivos para el desarrollo de bienes y servicios en diversas áreas (Villacreses Soledispa *et al*., 2022). A lo largo de la historia, el avance del conocimiento científico y tecnológico ha impulsado su evolución, permitiendo la generación de innovaciones con un impacto significativo en sectores como la salud, la agricultura, la industria y el medio ambiente (Villacreses Soledispa *et al*., 2022).

Debido a su capacidad para ofrecer soluciones a desafíos globales, la biotecnología se ha consolidado como una herramienta esencial en la ciencia y la economía mundial (Chazhaev, 2023). En esta revisión se presenta un estado del arte sobre la biotecnología, abordando su desarrollo histórico, sus principales aplicaciones y su impacto en la actualidad.

Definiendo "*biotecnología*"

Si bien los principios de la biotecnología se remontan a los inicios de la civilización humana, el término "biotecnología" fue acuñado en 1919 por el ingeniero húngaro Károly Ereky en su obra *Biotechnologie der Fleisch-, Fett- und Milcherzeugung im landwirtschaftlichen Großbetriebe* (Biotecnología de la producción de carne, grasa y leche en grandes explotaciones agrícolas) (Ereky, 1919). Desde entonces, el concepto ha evolucionado significativamente, integrando disciplinas como la biología molecular y la ingeniería genética, y expandiéndose a sectores clave como la salud, el medio ambiente y la industria.

Actualmente, basados en las definiciones de "biotecnología" dadas por organismos, asociaciones e instituciones de referencia a nivel nacional e internacional, podemos concluir que, la Biotecnología es el conjunto de técnicas que involucran la utilización de organismos, parte de ellos o análogos para el desarrollo de productos o servicios.

Antecedentes de la biotecnología

Los inicios de la biotecnología se remontan a la prehistoria, específicamente al periodo mesolítico (aproximadamente entre 10,000 y 8,000 a.n.e.), cuando el ser humano comenzó a domesticar plantas y animales, aplicando de forma empírica la selección artificial con fines alimentarios (Casas *et al*., 2016). Durante este mismo periodo surgieron las primeras técnicas de preservación y transformación de alimentos, como la fermentación, que marcan los orígenes de la biotecnología tradicional (Casas *et al*., 2016).

En la Edad Antigua, diversas civilizaciones desarrollaron prácticas biotecnológicas asociadas principalmente a la fermentación de alimentos y bebidas. En el antiguo Egipto, por ejemplo, se elaboraba cerveza a partir de pan de malta tostado y se reutilizaban los restos de fermentación como inóculo para nuevos lotes (Mayans, 2023; Renneberg, 2019). Los sumerios perfeccionaron estas técnicas y los babilonios añadieron fermentación láctica para mejorar la conservación (Renneberg, 2019). Los celtas y germánicos elaboraban aguamiel y lo almacenaban bajo tierra (Renneberg, 2019). En la antigua China, hace unos 9,000 años, se desarrollaron alimentos y bebidas fermentados que incluyeron salsa de soya, tofu, vino y vinagre de arroz; además de, la sericultura (producción de seda) y se registraron avances notables en medicina tradicional, mediante el uso de mohos y plantas con propiedades terapéuticas (Li *et al*., 2010). Por su parte, en Mesoamérica, también se desarrollaron formas de biotecnología empírica, como la fermentación del cacao y el maíz, la nixtamalización y la domesticación de especies como el maíz, el frijol y el chile (Escamilla Hurtado y Escamilla Hurtado, 2007).

Durante la Edad Media, la biotecnología continuó desarrollándose en contextos como la alquimia y la medicina natural, aunque con escasa sistematización científica (Renneberg, 2019).

Fue en la Edad Moderna cuando, gracias a avances en el conocimiento científico, se dieron pasos fundamentales. El naturalista Antonie van Leeuwenhoek (1632–1723) observó por primera vez bacterias y levaduras en una muestra de cerveza, abriendo el camino para el estudio de los microorganismos (Renneberg, 2019).

En el siglo XIX, Joseph Louis Gay-Lussac demostró la relación entre el azúcar de la uva y la generación de alcohol etílico y CO_2 durante la fermentación (Renneberg, 2019). Posteriormente, Louis Pasteur consolidó el campo al demostrar que la fermentación era un proceso biológico mediado por microorganismos (Renneberg, 2019). Sus estudios dieron lugar a los conceptos de pasteurización, vacunas y microbiología moderna, y sentaron las bases de la biotecnología industrial alimentaria y sanitaria (Renneberg, 2019).

En el siglo XX, la biotecnología se expandió rápidamente con hitos como:

- El descubrimiento de la estructura del ADN y el desarrollo de la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR) en los años 80 (Padrón López *et al*., 2022).
- La aparición de la ingeniería genética y la manipulación de ácidos nucleicos, lo cual sentó las bases para la creación de organismos genéticamente modificados (Padrón López *et al*., 2022; Renneberg, 2019).

Estas innovaciones permitieron aplicaciones revolucionarias en la medicina, la agricultura y la industria, marcando el inicio de la biotecnología moderna.

En las últimas décadas, la biotecnología ha seguido evolucionando con el uso de herramientas como CRISPR-Cas9 para edición genética, el desarrollo de la biotecnología sintética, la bioinformática y la aplicación de inteligencia artificial para diseñar medicamentos, enzimas y microorganismos con alta precisión (Andrade *et al*., 2021; Gauthier *et al*., 2019).

Clasificación de la Biotecnología basada en las técnicas

La biotecnología puede clasificarse de distintas maneras, y una de las más relevantes es con base en las técnicas utilizadas para la generación de productos o servicios. Esta clasificación clásicamente distingue entre biotecnología tradicional y biotecnología moderna, cada una con enfoques, herramientas y niveles de complejidad diferentes. En este sentido, la Federación Europea de Biotecnología (EFB) define la biotecnología tradicional a las técnicas convencionales que se han utilizado durante muchos siglos para producir cerveza, vino, queso y muchos otros alimentos, mientras que la biotecnología "nueva" abarca todos los métodos de modificación genética mediante técnicas de ADN recombinante y fusión celular junto con los desarrollos modernos de los procesos biotecnológicos "tradicionales" (Smith, 2009).

Biotecnología tradicional

La biotecnología tradicional comprende el uso empírico de organismos vivos, como levaduras, bacterias o mohos, para la elaboración de productos alimenticios, bebidas fermentadas y otros derivados biológicos (Knäblein, 2013; Renneberg, 2019). Estas prácticas se remontan a las primeras civilizaciones humanas y se caracterizan por no requerir un conocimiento profundo de los mecanismos moleculares subyacentes (Knäblein, 2013). En este tipo de biotecnología también se incluyen técnicas como la selección artificial de cultivos y animales, utilizadas durante siglos para mejorar su rendimiento, resistencia y productividad sin intervención directa en su material genético (Casas *et al*., 2016).

Biotecnología moderna

La biotecnología moderna se caracteriza por el uso de herramientas avanzadas basadas en la biología molecular, la genética, las ciencias ómicas y la bioinformática (Knäblein, 2013). A partir del siglo XX, estas técnicas revolucionaron el campo al permitir la manipulación intencionada del ADN y otros componentes celulares con fines específicos (Srivastava y Garg, 2024). Adicionalmente, la incorporación de inteligencia artificial (IA) en la biotecnología moderna ha permitido optimizar el diseño de enzimas, medicamentos y microorganismos de producción con una precisión sin precedentes (Holzinger *et al*., 2023).

Clasificación de la Biotecnología basada en la aplicación

En 2012, el profesor polaco Pawel Kafarski publicó la obra *Rainbow Code of Biotechnology,* en la que propuso una clasificación cromática de la biotecnología, asignando un color distintivo a cada una de sus áreas de aplicación, véase Figura 1 (Kafarski, 2012). Aunque esta clasificación ha sido ampliamente aceptada en la comunidad científica como una herramienta útil para la organización y divulgación del conocimiento biotecnológico, es importante señalar que no existe un consenso absoluto al respecto. Dependiendo de la fuente consultada, ciertas aplicaciones pueden asociarse con diferentes colores, e incluso ser incluidas en más de una categoría (Chazhaev, 2023).

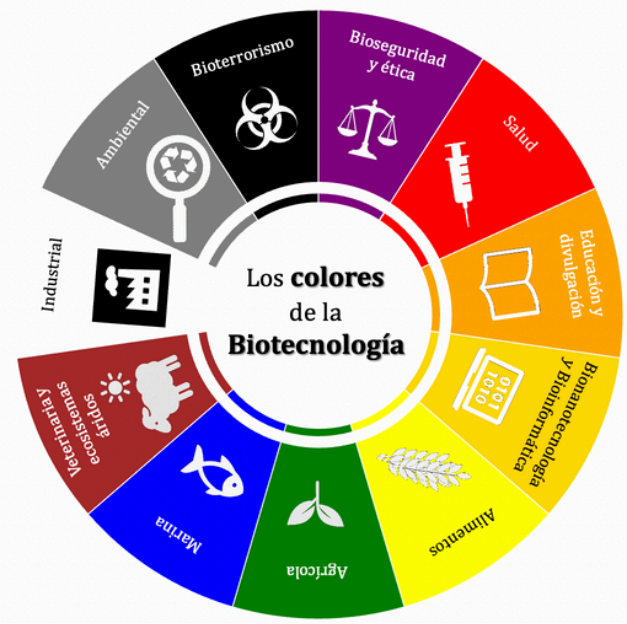

Figura 1. Clasificación de la Biotecnología basada en el área de aplicación.

Violeta: Aspectos éticos y bioseguridad de la Biotecnología

La biotecnología violeta abarca los aspectos legales, filosóficos, éticos y de bioseguridad asociados al desarrollo y aplicación de la biotecnología y sus productos derivados (Acosta Murillo y Castañon Baltazar, 2022; da Silva Campos *et al*., 2021). Esta rama se enfoca en establecer marcos normativos que regulen el uso seguro de herramientas biotecnológicas, así como en la protección de los derechos de propiedad intelectual mediante patentes y otros instrumentos jurídicos (Soumia *et al.*, 2023).

A diferencia de otras áreas, la complejidad de la biotecnología violeta radica en los dilemas éticos, filosóficos y religiosos que plantea, los

cuales pueden diferir considerablemente entre distintas culturas, contextos geográficos e incluso entre individuos dentro de una misma comunidad (Kafarski, 2012). Esta variabilidad representa un desafío clave para la formulación de políticas públicas y la aceptación social de las innovaciones biotecnológicas (Acosta Murillo y Castañon Baltazar, 2022).

Rojo: Biotecnología médica

La biotecnología roja comprende la aplicación de herramientas biotecnológicas en el ámbito de la salud humana, abarcando principalmente los sectores médico y farmacéutico (DaSilva, 2004; Ortega-Ante, 2020). Este campo incluye actividades como el desarrollo y producción de nuevos fármacos, vacunas y antibióticos; la implementación de terapias regenerativas; la biofabricación de órganos artificiales; así como el diseño de estrategias innovadoras para el diagnóstico, pronóstico y tratamiento de enfermedades (DaSilva, 2004).

Los avances más relevantes en biotecnología roja han sido posibles gracias al uso de técnicas de biología molecular, ingeniería genética y ciencias ómicas (genómica, transcriptómica, proteómica, entre otras), lo cual ha permitido una mejora sustancial en la comprensión de las patologías humanas y en la generación de soluciones terapéuticas y preventivas de alta especificidad (Gutierrez Reyes *et al*., 2024).

Un ejemplo emblemático de su aplicación reciente es el desarrollo de pruebas diagnósticas serológicas y de PCR para la detección del virus de SARS-CoV-2, así como los tratamientos diseñados contra la COVID-19 (Javier Díaz-Castrillón y Toro-Montoya, 2020). Estos abarcaron desde enfoques tradicionales, como la terapia con plasma de personas recuperadas para tratar a pacientes graves, hasta métodos modernos, como el uso de anticuerpos monoclonales y la generación de vacunas mediante ingeniería genética (Iannizzi *et al*., 2023; Vargas *et al*., 2021).

Otras aplicaciones que ilustran el potencial transformador de esta área incluyen la producción de proteínas terapéuticas en animales transgénicos y el diseño de anticuerpos monoclonales humanizados, los cuales han revolucionado el tratamiento de enfermedades autoinmunes, infecciosas y oncológicas (Sadeghalvad y Rezaei, 2021).

Naranja: Educación y divulgación de la Biotecnología

La biotecnología naranja abarca las actividades relacionadas con la educación, divulgación y comunicación pública de la biotecnología (Arana-Cuenca *et al*., 2022). Si bien no es una aplicación tecnológica directa, esta rama cumple con la función estratégica de promover la comprensión, aceptación e integración del conocimiento biotecnológico en la sociedad (Arana-Cuenca et al., 2022). Su objetivo principal es facilitar el acceso a información confiable y actualizada sobre los avances científicos y sus implicaciones, fomentando una ciudadanía informada y crítica (Arana-Cuenca *et al*., 2022).

Dorada: Bioinformática y nanobiotecnología

La biotecnología dorada está enfoca al procesamiento de datos y comprende dos áreas altamente especializadas: la bioinformática y la nanobiotecnología (Acosta Murillo y Castañon Baltazar, 2022; da Silva Campos *et al.*, 2021). La primera se encuentra estrechamente vinculada con las tecnologías de la información, ya que emplea herramientas computacionales para el análisis, interpretación y modelado de datos biológicos (Acosta Murillo y Castañon Baltazar, 2022). Por su parte, la nanobiotecnología se enfoca en el uso de organismos vivos o sus componentes a escala nanométrica, aprovechando sus propiedades fisicoquímicas para el desarrollo de innovaciones tecnológicas (Singh y Jain, 2024; Srivastava y Garg, 2024).

Esta rama de la biotecnología abarca desde el diseño in silico de fármacos, enzimas y rutas metabólicas, mediante modelos computacionales, hasta la síntesis de nanoestructuras funcionales dentro de sistemas biológicos, lo que abre nuevas posibilidades en campos como la medicina personalizada, la liberación dirigida de compuestos terapéuticos, la ingeniería de tejidos y otras aplicaciones biotecnológicas emergentes (Gauthier *et al*., 2019; Srivastava y Garg, 2024).

Amarilla: Biotecnología alimentos

La biotecnología amarilla, también conocida como biotecnología de alimentos, es probablemente una de las ramas más antiguas de la biotecnología (Acosta Murillo y Castañon Baltazar, 2022). Su objetivo principal ha sido históricamente el aumento de la productividad y el rendimiento en la producción de alimentos, así como la solución de los desafíos relacionados con el abastecimiento alimentario para la población mundial (Augustin *et al*., 2024; Jácome Pilco *et al*., 2023).

En la actualidad, sus aplicaciones se han ampliado para incluir el desarrollo de alimentos funcionales que promuevan la salud, tales como aquellos enriquecidos con nutrientes esenciales, fortificados con aditivos bioactivos, o modificados para eliminar alérgenos y compuestos que provocan intolerancias alimentarias; además, de la creación de organismos modificados genéticamente y transgénicos (Cabrera-Barjas *et al*., 2021).

Entre las contribuciones más destacadas de la biotecnología amarilla se encuentran productos tradicionales obtenidos por fermentación, como la amplia variedad de derivados lácteos, bebidas alcohólicas, pan y otros alimentos fermentados (Augustin *et al*., 2024). Asimismo, incluye el desarrollo de

nutracéuticos, definidos como productos derivados de alimentos que ofrecen beneficios adicionales a la salud, y la producción biotecnológica de pigmentos naturales y suplementos alimenticios, que mejoran tanto el valor nutricional como las propiedades funcionales de los alimentos (Augustin *et al*., 2024).

Verde: Biotecnología agrícola

La biotecnología verde se orienta a la mejora de cultivos agrícolas mediante la generación de plantas más fértiles y con mayor resistencia al estrés biótico (como plagas y enfermedades) y abiótico (como sequía, salinidad o temperaturas extremas), así como al desarrollo y aplicación de fertilizantes y biopesticidas respetuosos con el medio ambiente (Ortega-Ante, 2020). Gran parte de los avances en esta área han sido posibles gracias al uso de organismos genéticamente modificados (OGM), los cuales permiten introducir características deseables en los cultivos, optimizando así la productividad agrícola (Barcelos *et al*., 2018).

Por estas razones, algunos autores consideran a la biotecnología verde como una posible siguiente fase de la Revolución Verde, al ofrecer alternativas sostenibles y de alto impacto para enfrentar los desafíos del hambre y la seguridad alimentaria a nivel global (López Puc *et al*., 2021).

Entre sus aplicaciones destacan la selección genética de plantas con rasgos específicos, el cultivo de células y tejidos vegetales, la micropropagación, así como técnicas avanzadas como la reproducción inversa y la generación de haploides dobles, un método que permite obtener plantas homocigotas a partir de progenitores heterocigotos, facilitando la consolidación de líneas con características agronómicas deseables (López Puc *et al*., 2021).

Azul: Biotecnología marina

La biotecnología azul implica el aprovechamiento sustentable de los recursos marinos para el desarrollo de soluciones innovadoras aplicables a diversos sectores, a través de la obtención de productos como biomedicamentos, cosméticos, biocombustibles y alimentos funcionales (Chazhaev, 2023; Prabha *et al*., 2019).

Entre los productos más representativos derivados de esta área destacan los biocombustibles obtenidos a partir de microalgas fotosintéticas, cuya eficiencia en la captura de CO_2 y en la producción de lípidos los convierte en una alternativa prometedora frente a los combustibles fósiles (Prabha *et al*., 2019). Asimismo, se incluyen los biomateriales marinos, particularmente los hidrocoloides y agentes gelificantes (como el agar, alginato y carragenina), los cuales tienen una amplia gama de aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética, debido a sus propiedades funcionales y su origen renovable (Anestopoulos *et al*., 2020; Prabha *et al*., 2019).

Marrón: Biotecnología aplicada a ecosistemas áridos y semiáridos y al ámbito veterinario

El color marrón representa la aplicación de la biotecnología a ecosistemas áridos y semiáridos (da Silva Campos *et al.*, 2021; Rodríguez-Núñez *et al*., 2020). Adicionalmente, autores también relacionan dicho color con la aplicación en el ámbito veterinario, en la producción ganadera y en la generación de productos zoosanitarios (Ortega-Ante, 2020).

La biotecnología aplicada a entornos áridos y semiáridos tiene como objetivo adaptar cultivos y especies vegetales a condiciones ambientales adversas, como sequía, salinidad y altas temperaturas, así como recuperar suelos erosionados o en proceso de desertificación (Rodríguez-Núñez *et al*., 2020). Las estrategias para alcanzar estos fines incluyen el aprovechamiento de la biodiversidad endémica y el desarrollo de tecnologías de producción sustentable en zonas con escasez hídrica (Rodríguez-Núñez *et al*., 2020).

En el contexto veterinario, la biotecnología marrón comprende el mejoramiento genético de animales y la optimización en la producción de derivados de origen animal (Ortega Ante, 2020). No obstante, dado que parte considerable de sus aplicaciones incluyen el desarrollo de fármacos, vacunas y tratamientos enfocados en la salud animal, no es inusual que algunos autores, organizaciones e instituciones clasifiquen estas prácticas dentro de la biotecnología roja, restringiendo así el color marrón exclusivamente a las aplicaciones en ecosistemas áridos y semiáridos; mientras que, en otros casos se incluye como parte de la biotecnología verde (Chazhaev, 2023).

Blanco: Biotecnología industrial

La biotecnología blanca abarca toda aplicación de organismos vivos, consorcios microbianos o enzimas en procesos industriales, con el objetivo de hacer tanto los procesos como sus productos más sostenibles (Kordi *et al.*, 2022). Entre sus principales metas se encuentran el reemplazo de procesos químicos convencionales por alternativas biológicas más respetuosas con el medio ambiente, el desarrollo de bioproductos, y la promoción de modelos productivos basados en la economía circular (Kordi *et al.*, 2022).

Gris: Biotecnología del medio ambiente y forense

La biotecnología gris busca promover la sostenibilidad y la protección del medio ambiente mediante la comprensión y gestión

de los sistemas biológicos en el entorno natural, así como a través del uso de biofiltros y técnicas de biorremediación aplicadas a agua, suelo y aire (Roy y Gupta, 2023). Entre sus aplicaciones destacan el uso de biocatalizadores para transformar subproductos contaminantes en compuestos útiles, como en el caso del tratamiento de residuos alimentarios o industriales (Roy y Gupta, 2023). Ejemplos clave incluyen la valoración de residuos del suero lácteo, la conversión de desechos del café en materiales valiosos dentro del concepto de biorrefinería, y la producción de biocombustibles como el biodiésel y el bioetanol a partir de materiales residuales (Roy y Gupta, 2023). Estas aplicaciones no solo reducen el impacto ambiental, sino que también promueven un modelo de economía circular y sustentabilidad energética.

Negro: Bioterrorismo o biotecnología bélica

Finalmente, la biotecnología negra hace referencia al uso de herramientas biotecnológicas con fines bélicos o de bioterrorismo, incluyendo la creación y posible utilización de armas biológicas (Pande y J., 2024). Se trata de un campo altamente controvertido, cuya discusión se enfoca en la necesidad de establecer mecanismos de control ético, legal y bioseguro para prevenir su desarrollo y uso indebido (da Silva Campos *et al*., 2021).

A nivel internacional, existen instrumentos jurídicos orientados a su regulación y prohibición, entre los que destacan el Protocolo de Ginebra (1925), que prohíbe el uso en guerra de armas químicas y biológicas, y la Convención sobre Armas Biológicas (CAB) de 1972, el primer tratado multilateral que prohíbe completamente el desarrollo, la producción y el almacenamiento de este tipo de armas (López-Muñoz *et al*., 2021). Ambos acuerdos representan un pilar fundamental en la vigilancia y contención de los riesgos asociados a la biotecnología negra.

Conclusiones y perspectivas

La biotecnología ha evolucionado desde prácticas empíricas milenarias hasta convertirse en un pilar de la innovación científica y tecnológica del siglo XXI. Su clasificación cromática permite comprender la diversidad de aplicaciones y enfoques que coexisten bajo un mismo marco conceptual, desde la salud humana y la producción agrícola hasta la protección ambiental, la seguridad alimentaria y el desarrollo industrial sostenible. Esta pluralidad evidencia no solo su capacidad de adaptación, sino también su relevancia estratégica en la resolución de desafíos globales.

En el contexto actual, marcado por crisis sanitarias, cambio climático, pérdida de biodiversidad y desigualdades sociales, la biotecnología se proyecta como una herramienta clave para promover el bienestar colectivo. Sin embargo, su desarrollo también plantea dilemas éticos, jurídicos y sociales que exigen una regulación robusta, inclusiva y contextualizada. Las diferencias culturales en torno a la aceptación de ciertas tecnologías, como los organismos genéticamente modificados o la edición del genoma humano, requieren una mirada crítica que integre la participación ciudadana y el diálogo interdisciplinario.

Las perspectivas futuras apuntan a una biotecnología más integrada con otras disciplinas emergentes, como la inteligencia artificial, la nanotecnología y la ciencia de datos, lo que permitirá optimizar procesos, reducir costos y ampliar su impacto en regiones aún rezagadas tecnológicamente. Asimismo, será fundamental fortalecer la educación científica, la ética aplicada y las políticas públicas para garantizar un desarrollo biotecnológico que sea equitativo, sostenible y orientado al bien común. En suma, la biotecnología no solo transforma la manera en que enfrentamos los retos del presente, sino que redefine las posibilidades del futuro.

Literatura citada

- Acosta Murillo, R., y Castañon Baltazar, J. C. (2022). Las tendencias, perspectivas, áreas y colores de la biotecnología. *Revista Digital Universitaria, 23*(4). https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.4.10
- Andrade, G., Alcántara, H., González, M., Silva, R., Vilchis Landeros, L., Tonatiuh, V., Silvia, L., y Estela, R. (2021). Uso del sistema CRISPR-Cas9 para la edición de genes en organismos modelo y líneas celulares. *Mensaje Bioquímico, 45*, 134–156. http://bq.facmed.unam.mx/tab
- Anestopoulos, I., Kiousi, D. E., Klavaris, A., Maijo, M., Serpico, A., Suarez, A., Sanchez, G., Salek, K., Chasapi, S. A., Zompra, A. A., Galanis, A., Spyroulias, G. A., Gombau, L., Euston, S. R., Pappa, A., y Panayiotidis, M. I. (2020). Marine-derived surface-active agents: Health- promoting properties and blue biotechnology-based applications. In *Biomolecules, 10*(6), 1–27. https://doi.org/10.3390/biom10060885
- Arana-Cuenca, A., Ransanz Reyes, E., Curto Prieto, M., y Romero-García. (2022). Biotecnología por colores: Impacto en el rendimiento académico del alumnado de educación secundaria. En C. Romero García (Ed.), *Innovación docente y prácticas educativas para una educación de calidad*. Dykinson, S.L.
- Augustin, M. A., Hartley, C. J., Maloney, G., y Tyndall, S. (2024). Innovation in precision fermentation for food ingredients. En *Critical Reviews in Food Science and Nutrition,64*(18), 6218–6238. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2166014
- Barcelos, M. C. S., Lupki, F. B., Campolina, G. A., Nelson, D. L., y Molina, G. (2018). The colors of biotechnology: General overview and developments of white, green and blue areas. *FEMS Microbiology Letters, 365*(21). https://doi.org/10.1093/femsle/fny239
- Cabrera-Barjas, G., Banerjee, A., Valdes, O., Moncada, M., Sirajunnisa, A. R., Surendhiran, D., Ramakrishnan, G., Rani, N. S., Hamidi, M., Kozani, P. S., Kozani, P. S., Espitia, P. J. P., Fuenmayor, C. A., Pierre, G., Michaud, P., Lukova, P., y Delattre, C. (2021). Food biotechnology: Innovations and challenges. En *Future Foods: Global Trends, Opportunities, and Sustainability Challenges*. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91001-9.00038-4
- Casas, A., Parra, F., Blancas Vázquez, J., Rangel-Landa, S., Vallejo, M., Figueredo, C. J., y Moreno-Calles, A. I. (2016). Origen de la domesticación y la agricultura: cómo y por qué. En UNAM-UNALM (Ed.), Domesticación en el Continente Americano. https://www.researchgate.net/publication/314090020
- Chazhaev, M. (2023). The current state of the biotechnology market and its main development trends. BIO Web of Conferences, 76, 09009. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237609009
- da Silva Campos, M., Batista de Sousa, F. J., Martins, F. J., & Castro, H. C. (2021). Dark Biotechnology: Reminding the Imminent Threats for World Largest Food Producers During COVID-19 Pandemic Situation. Advances in Biotechnology & Microbiology, 16(3), 27–35. https://doi.org/10.19080/aibm.2021.16.555939
- DaSilva, E. J. (2004). The Colours of Biotechnology: Science, Development and Humankind. *Electronic Journal of Biotechnology, 7*(3), 1–2.
- Ereky, K. (1919). *Biotechnologie der Fleisch-, Fett-, und Milcherzeugung im landwirtschaftlichen Grossbetriebe: für naturwissenschaftlich gebildete Landwirte verfasst.* P. Parey.
- Escamilla Hurtado, M. de L., y Escamilla Hurtado, M. G. (2007). Los alimentos fermentados que comían nuestros bisabuelos prehispánicos. *Ciencia,* 75.
- Gauthier, J., Vincent, A. T., Charette, S. J., y Derome, N. (2019). A brief history of bioinformatics. *Briefings in Bioinformatics, 20*(6), 1981–1996. https://doi.org/10.1093/bib/bby063
- Gutierrez Reyes, C. D., Alejo-Jacuinde, G., Perez Sanchez, B., Chavez Reyes, J., Onigbinde, S., Mogut, D., Hernández-Jasso, I., Calderón-Vallejo, D., Quintanar, J. L., y Mechref, Y. (2024). Multi Omics Applications in Biological Systems. In *Current Issues in Molecular Biology, 46*(6), 5777–5793. https://doi.org/10.3390/cimb46060345
- Holzinger, A., Keiblinger, K., Holub, P., Zatloukal, K., y Müller, H. (2023). AI for life: Trends in artificial intelligence for biotechnology. *New Biotechnology, 74,* 16–24. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2023.02.001
- Iannizzi, C., Chai, K. L., Piechotta, V., Valk, S. J., Kimber, C., Monsef, I., Wood, E. M., Lamikanra, A. A., Roberts, D. J., McQuilten, Z., So-Osman, C., Jindal, A., Estcourt, L. J., Kreuzberger, N., y Skoetz, N. (2023). *Convalescent plasma for people with COVID-19: a living systematic review. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2024*(2). https://doi.org/10.1002/14651858.cd013600.pub6
- Jácome Pilco, C., Alucho Quinaloa, M., Muyulema Cuvi, E., Tulmo Negrete, E., y García Muñoz, M. (2023). Alimentos transgénicos: sus beneficios para la nutrición en América Latina y el Caribe. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 4*(1). https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.354
- Javier Díaz-Castrillón, F., & Toro-Montoya, A. I. (2020). SARS-CoV-2/COVID-19: el virus, la enfermedad y la pandemia. *Medicina & Laboratorio, 24*(3), 183–205. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14995-5

- Kafarski, P. (2012). Rainbow code of biotechnology. *Chemik, 8*. http://pl.wikipedia.org/wiki/Biotechnologia
- Knäblein, J. (2013). Twenty Thousand Years of Biotech - From "Traditional" to "Modern Biotechnology." En *Modern Biopharmaceuticals: Recent Success Stories* (pp. 1–38). https://doi.org/10.1002/9783527669417.ch1
- Kordi, M., Salami, R., Bolouri, P., Delangiz, N., Asgari Lajayer, B., y van Hullebusch, E. D. (2022). White biotechnology and the production of bio-products. *Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2*(3), 413–429. https://doi.org/10.1007/s43393-022-00078-8
- Li, Z., Ji, X., Kan, suli, Qiao, H., Jiang, M., Lu, D., Wang, J., Huang, H., Jia, H., Ouyuang, P., y Ying, H. (2010). Past, Present, and Future Industrial Biotechnology in China. En G. T. Tsao, P. Ouyang, J. Chen (Eds.), *Biotechnologu in China II: Chemicals, Energy and Environment.* Springer Heidelberg Dordrecht London New York. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14995-5
- López Puc, G., Cano Sosa, J. del S., Ramos Díaz, A., y Uc-Váguez, A. (2021). Biotecnología Vegetal: Conceptos, técnicas y herramientas. En J. del S. Cano Sosa & G. López Puc (Eds.). *Alcances y perspectivas del área de Biotecnología Vegetal del CIATEJ en el Sureste de México*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.
- López-Muñoz, F., Salas-Moreno, P., Montero-Sánchez, M., De-la-Puente-Mora-Figueroa, I., Suárez-Muñoz, A., García-Crespín, J., y Díaz-Muñoz, F. (2021). Amenazas biológicas intencionadas: implicaciones para la Seguridad Nacional. *Sanidad Militar, 77*(2), 98–105. https://doi.org/10.4321/s1887-85712021000200006
- Mayans, C. (2023). *Historia National Geographic. Frutas, Pan, Cerveza...* La Producción de Alimentos En El Antiguo Egipto. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/carnes-frutas-verduras-pan-cerveza-la-produccion-de-alimentos-en-el-antiguo-egipto_19480
- Ortega-Ante, D. A. (2020). Enfoque de la Biotecnología Industrial en Ecuador y la Provincia de Esmeraldas. *Polo Del Conocimiento, 5(*8), 1228–1239. https://doi.org/10.23857/pc.v5i8.1655
- Padrón López, R. M., Hernández Marín, A., y Lesher Gordillo, J. M. (2022). Historia y aplicaciones de la reacción en cadena de la polimerasa en el diagnóstico clínico. *Kuxulkab, 28*(61), 23–32. https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a28n61.4593
- Pande, A., y J., A. (2024). Dark Biotechnology -An Emerging Solution To CBRN Emergencies. *The Defence Horizon Journal*. https://doi.org/10.5281/zenodo.10701826
- Prabha, S. P., Nagappan, S., Rathna, R., Viveka, R., y Nakkeeran, E. (2019). Blue biotechnology: A vision for future marine biorefineries. En *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts: Technology, Advances, Life Cycle Assessment, and Economics* (pp. 463–480). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00021-1
- Renneberg, R. (2019). *Biotecnología para principiantes* (R. Renneberg, Ed.). Editorial Reverté.
- Rodríguez-Núñez, K., Rodríguez-Ramos, F., Leiva-Portilla, D., y Ibáñez, C. (2020). Brown biotechnology: a powerful toolbox for resolving current and future challenges in the development of arid lands. *SN Applied Sciences, 2*(7), 1187. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2980-0
- Roy, I., y Gupta, M. N. (2023). White y grey biotechnologies for shaping a sustainable future. *RSC Sustainability, 66*. https://doi.org/10.1039/d3su00174a
- Sadeghalvad, M., y Rezaei, N. (2021). Introduction on Monoclonal Antibodies. En *Monoclonal Antibodies.* https://doi.org/10.5772/intechopen.98378
- Singh, A. K., y Jain, B. (2024). *Bionanotechnology for Advanced Applications*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003362258
- Smith, J. E. (2009). *Biotechnology* (5ed.). Cambridge Univ Pr.
- Soumia, B., Rofia, A., y Nadia, Y. (2023). Biotechnology: definitions, types and main applications. *YMER Digital, 22*(4), 563–575. https://doi.org/10.37896/YMER22.04/49
- Srivastava, P., y Garg, P. (2024). Omics Applications and Avenues. Cambridge Scholars Publishing.
- Vargas, M. R., Melendrez-Arango, E. C., Durán-Aguirre, M. L., Quiñones Lucero, L., y Peralta-Peña, S. L. (2021). Tratamiento farmacológico en pacientes con COVID-19: una revisión integradora. *SANUS, 6*, e250. https://doi.org/10.36789/revsanus.vi1.250
- Villacreses Soledispa, D. J., Bermúdez Rodríguez, A. N., Campozano Pilay, Y. H., y Álvarez Márquez, N. del C. (2022). La biotecnología y su impacto con el uso de las tecnologías. *Journal TechInnovation, 1*(2), 78–87. https://doi.org/10.47230/journal.techinnovation.v1.n2.2022.78-87