

La Biotecnología moderna: una espada de Damocles en la era del gen

Modern Biotechnology: a sword of Damocles in the age of the gene

Jesús Erazo ¹

Pablo Sulbarán ²

Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida Kléber Ramírez, Mérida, Venezuela¹

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Mérida, Venezuela^{1,2}

jerazo@cenditel.gob.ve¹

psulbaran@cenditel.gob.ve²

Fecha de recepción: 03/10/2023

Fecha de aceptación: 17/10/2023

Pág: 157 – 173

Resumen

La biotecnología moderna, más allá del cruce de semillas y la fermentación, brinda una amplia gama de oportunidades para combatir enfermedades comunes y crónicas, solucionar la inseguridad alimentaria, contribuir con la eliminación de contaminantes en la naturaleza e incluso servir en la mitigación del cambio climático. Sin embargo, en analogía con la espada de Damocles, existe una advertencia válida sobre los riesgos potenciales de esta tecnología, de modo que su progreso conlleva una gran responsabilidad. En tal sentido, el presente ensayo tiene como objetivo captar la atención sobre un tema que presenta profundas implicaciones para los seres humanos. Bajo este contexto, se da a conocer en su justa medida la tecnología, se presenta sus alcances y los riesgos asociados a la selección artificial junto con los principales actores detrás de su desarrollo. La finalidad de este escrito es servir como referente para el debate oportuno de ideas, así como una posible fuente para la toma de acciones a futuro sobre una tecnología emergente inmersa en una biorevolución que se forja al calor de los avances de la ingeniería genética, la biología molecular y sintética.

Palabras clave: biología sintética, biotecnología, CRISPR, ingeniería genética.



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Abstract

Modern biotechnology, beyond seed crossing and fermentation, offers a wide range of opportunities to combat common and chronic diseases, solve food insecurity, contribute to the elimination of pollutants in nature and even serve in the mitigation of climate change. However, in analogy with Damocles's sword, there is a valid warning about the potential risks of this technology, so its progress carries with it a great responsibility. In this sense, this essay aims to draw attention to an issue that has profound implications for humans. In this context, the technology, its scope and the risks associated with artificial selection are presented along with the main actors behind its development. The purpose of this paper is to serve as a reference for the timely debate of ideas, as well as a possible source for future action on an emerging technology immersed in a biorevolution that is being forged in the heat of advances in genetic engineering, molecular and synthetic biology. .

Key words: synthetic biology, biotechnology, CRISPR, genetic engineering.

Introducción

La salud y los alimentos son dos pilares fundamentales y estrechamente relacionados para la calidad de la vida humana, en relación con ésta, la biología moderna tiene el potencial de mejorarla de muchas maneras a través del aumento de la producción de alimentos, el desarrollo de nuevos medicamentos y la creación de nuevas fuentes de energías alternativas. Ante el incremento de la población mundial y los efectos negativos del uso de los combustibles fósiles en la salud del planeta, la biotecnología gana cada vez más adeptos en el ámbito académico, ambientalista, sanitario, fitosanitario e industrial.

Está claro que la agricultura y los fármacos, sin lugar a dudas resultan más que esenciales para la supervivencia y el bienestar de la humanidad, además desempeñan un rol fundamental en la economía global e incluso en la calidad ambiental. Un elemento clave para su desarrollo y por consiguiente para el mejoramiento de la esperanza de vida de los seres humanos, ha sido el avance de la ciencia y la tecnología en los sectores agrícolas y farmacéutico.

En efecto, en los dos últimos siglos, los avances en biología, química y biotecnología, han permitido el sustento y la salud de millones de seres humanos. Por ejemplo, avanzado el siglo XIX, dos científicos revolucionaron las ciencias de la vida e impulsaron el progreso en la inmunología clínica y la producción agrícola. En 1857, Louis Pasteur, un químico y bacteriólogo francés, contribuyó con el desarrollo de la microbiología al demostrar que el proceso de la fermentación es causada por microorganismos (hongos y bacterias). En 1866, Gregor Mendel, un monje agustino y naturalista austriaco, fue pionero en el estudio científico de los genes y la herencia, su descripción de las leyes fundamentales de la herencia, publicada

en su libro *Experimentos sobre híbridos en plantas*, estableció las bases científicas de la genética.

En ese sentido, los descubrimientos de Mendel y Pasteur tuvieron un profundo impacto en la ciencia, la medicina y la salud pública. Por un lado, las leyes de Mendel son los pilares de la biotecnología moderna: ingeniería genética y edición del genoma. Por el otro, el trabajo precursor de Pasteur sobre microorganismos, la fermentación y la inmunización, sirvió para el desarrollo del proceso alimenticio de la pasteurización, la esterilización y la creación de vacunas; elementos vitales para la prevención y tratamiento de enfermedades infecciosas. Más allá del cruce de semillas y la fermentación, las investigaciones pioneras de Mendel y Pasteur, son la base para una amplia gama de aplicaciones biotecnológicas como: cultivos transgénicos, elaboración de biocombustibles y diseño de nuevos materiales.

Ahora bien, la biotecnología es un campo en constante evolución y su futuro es muy prometedor. A medida que avanza sus herramientas y técnicas, se abre un amplio abanico de posibilidades de sus aplicaciones en el ámbito de la salud, la alimentación, la energía y el medio ambiente. Por ejemplo, la tecnología *CRISPR* (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) se está utilizando para intentar comprender la alteración genética que causa la anemia falciforme. Asimismo, se utiliza para editar los genomas de plantas cultivadas con fines de modificar su contenido nutricional, eliminar toxinas, aumentar su rendimiento, mejorar la resistencia a plagas, sequías e inundaciones (Doudna, 2022). Sin embargo, existen riesgos potenciales asociados a su uso. Por un lado, la ingeniería genética podría utilizarse para aumentar el rendimiento físico y la facultad cognitiva de cierto grupo de humanos. Por otro lado, la manipulación genética de plantas y animales puedan causar efectos adversos en la salud humana o daños ecológicos (Infante-López et al., 2022).

La espada de Damocles es una metáfora que se utiliza para referirse a una amenaza constante o a un peligro latente. Su origen se remonta a la antigua Grecia, donde se cuenta la historia de Damocles, un cortesano que le pidió al rey Dionisio que le permitiera experimentar el placer de ser rey por un día. Dionisio accedió, pero colocó una espada afilada colgando de una sola crin de caballo sobre la cabeza de Damocles, para que este experimentara la constante amenaza de la muerte (Garrido y Puche, 2018).

En la relación con la anécdota de la espada de Damocles, que se utiliza para referirse a una amenaza latente, en el contexto de la biotecnología moderna, se puede interpretar como una advertencia sobre los riesgos potenciales de esta tecnología. En efecto, la no neutralidad de la tecnología es una espada de Damocles porque tiene el potencial de favorecer un mejor presente y futuro para la humanidad, pero también plantea algunos desafíos éticos y sociales como crear organismos genéticamente modificados que pueden tener efectos desconocidos sobre el medio ambiente o peor aún, la creación de armas biológicas que puedan causar enfermedades o muerte.

Por tanto, llegados a este punto, los avances científicos y tecnológicos en el campo de la

biología y sus repercusiones en salud y alimentación deben ser colocados en una balanza. En este contexto, surgen naturalmente las siguientes preguntas: ¿hasta qué punto el desarrollo de la biotecnología moderna beneficia a la humanidad? ¿cuál es su impacto a futuro? ¿es una tecnología democrática o de fácil acceso? y ¿a nivel global, quiénes están detrás de su desarrollo?.

En tal sentido, el presente ensayo tiene como objetivo captar la atención sobre un tema que presenta profundas implicaciones para los seres humanos. Por un lado, la biotecnología brinda una amplia gama de oportunidades para combatir enfermedades y la hambruna, eliminar contaminantes ambientales y conservar la naturaleza. Por el otro, presenta un conjunto de desafíos inherentes a la manipulación y modificación genética. Por tanto, la finalidad de este trabajo es dar a conocer en su justa medida a la tecnología, comprender su alcance, principales actores, visibilizar sus aplicaciones, ventajas competitivas y riesgos, además servir como referente para el debate oportuno de ideas, así como una fuente para la toma de acciones a futuro sobre una tecnología emergente inmersa en una biorevolución que se forja al calor de los avances de la ingeniería genética, la biología molecular y sintética.

Oportunidades y riesgos latentes de la biotecnología

Por convenio, la biotecnología se define como: “la aplicación de la ciencia y la tecnología a organismos vivos, así como a sus partes, productos y modelos, para alterar materiales vivos o no vivos para la producción de conocimientos, bienes y servicios” (Organization for Economic Cooperation and Development, 2005, p. 9). La tecnología, tiene la facultad y el potencial de:

1. Aumentar la rentabilidad y eficiencia en los cultivos, la cría intensiva de animales y el desarrollo de medicamentos.
2. Contribuir con la mitigación del cambio climático.
3. Ayudar con la conservación ambiental.

Por tanto, la biotecnología está siendo utilizada y se proyecta aumentar aún más su uso, durante las próximas décadas, en los siguientes sectores: agropecuario, forestal, pesquero, farmacéutico e industrial.

En términos prácticos, la biotecnología modifica los genes de las células de plantas o animales con la finalidad de reforzar sus características o crear nuevos organismos a partir de aquéllos. En general, el desarrollo de biotecnología se basa en una amplia gama de disciplinas: biología molecular, química, matemáticas, biónica, ingeniería genética, genómica, nanotecnología e informática. El campo de sus aplicaciones va desde medicamentos y terapias que previenen y tratan enfermedades; diagnósticos médicos hasta biocombustibles (Barney y Lewis, 2022).

Ahora bien, aunque el término biotecnología – acuñado por el ingeniero agrónomo húngaro Karl Ereky en 1917 – puede resultar novedoso, sin embargo, los primeros productos biotecnológicos – que aun hoy en día se siguen elaborando – se remontan a la prehistoria, cuando la humanidad comenzó a utilizar los microorganismos para fermentar alimentos y bebidas (pan, cerveza, vino, queso y yogurt). Cabe destacar que en el proceso biológico de la fermentación se utiliza bacterias y hongos para convertir los azúcares en alcoholes, ácidos y otros compuestos. En el siglo XX, el avance de la ciencia y la tecnología propició el desarrollo de modernos productos biotecnológicos, por ejemplo, la insulina humana, vacunas, antibióticos y productos farmacéuticos contra el cáncer (Bisang et al., 2009). Es importante señalar que el primer producto biotecnológico moderno que utilizó la ingeniería genética fue la insulina humana recombinante, que se aprobó para su uso en el año de 1982.

Es necesario mencionar que son muchos los científicos que han contribuido al desarrollo de la biotecnología, además sus descubrimientos han tenido un impacto significativo en la salud, la nutrición y la sostenibilidad del medio ambiente. Dentro de los más destacados: Louis Pasteur (desarrolló la teoría de la fermentación y la pasteurización); Frederick Griffith (demostró que la transformación genética podía transferirse de una bacteria a otra); Oswald Avery (demostró que el ADN era el material genético); James Watson y Francis Crick (descubrieron la estructura del ADN); Har Gobind Khorana (desarrolló un método para sintetizar genes); Stanley Cohen y Herbert Boyer (desarrollaron un método para transferir genes de una bacteria a otra); Kary Mullis (desarrolló la reacción en cadena de la polimerasa (*PCR*)); Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier (desarrollaron *CRISPR-Cas9*).

En la actualidad, los avances en biotecnología están ocurriendo a un ritmo acelerado. Algunos de los avances más novedosos en biotecnología incluyen: la edición del genoma (*CRISPR-Cas9*), la biología sintética, bioimpresión, biocombustibles y los biodispositivos electrónicos (biochips). La edición genómica, resulta una tecnología prometedora para el reforzamiento de las características físicas, químicas y/o nutricionales de especies animales y vegetales en países que carecen de grandes ingresos económicos. Además, el CRISPR tiene el potencial de utilizarse en análisis genético para el estudio del genoma así como también para predecir el impacto de las mutaciones (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022).

Edición genética

El desarrollo de los seres vivos está condicionado por la información genética contenida en el ADN. La edición y modificación de un genoma son técnicas de la ingeniería genética basadas en la inserción, reemplazo o eliminación de alguna secuencia de ADN en un organismo. Es conveniente señalar que la edición y la modificación genética son procesos distintos: en el primer caso, no se utiliza ADN de otras especies, mientras que en el segundo caso, la modificación, utiliza otro ADN (Iberdrola, 2015). Básicamente existen tres técnicas para la

edición genética: Nucleasas de dedos de Zinc (ZNF), TALEN Y CRISPR-Cas9, siendo ésta última una de las más usadas.

Las Nucleasas de dedos de Zinc (*ZNF*) se basan en el principio de que parte de una proteína reconoce cierta secuencia de ADN y la otra parte la corta. Cada ZFN contiene dos dominios distintos: una proteína dedo de zinc que comprende un dominio de unión al ADN (en inglés, *DBD, DNA-binding domain*) compuesto por dos componentes de “dedo” cosidos juntos y un dominio nucleasa de escisión de ADN (Beckman, 2023).

El método TALEN utiliza cierto tipo de enzimas denominadas nucleasas efectoras de tipo activador de transcripción las cuales pueden ser diseñadas para identificar y fragmentar selectivamente secuencias concretas de ADN dentro del genoma de un organismo. El nombre de las enzimas TALEN deriva de sus siglas en inglés *Transcription Activator Like Effector Nuclease*. Esta técnica tiene por objeto reconocer secuencias de ADN mediante la fusión de una serie de dominios de unión al ADN más pequeños. Se pueden generar secuencias personalizadas de TALEs para reconocer secuencias genómicas únicas (Espinosa, 2021).

CRISPR es el acrónimo de *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, o Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Espaciadas. Es una tecnología de edición genética basada en la adaptación de un sistema de edición del genoma de las bacterias, el cual es usado como mecanismo de defensa inmune. Una vez que ocurre el ataque de los virus, las bacterias sobrevivientes captan información del agresor a través de fragmentos de ADN del mismo y lo guardan en su propio ADN constituyendo un nuevo patrón de arreglos que se denominan CRISPR. “Si los virus atacan de nuevo, las bacterias producen segmentos de ARN a partir de los arreglos CRISPR para reconocer y adjuntar regiones específicas del ADN de los virus” (Plus, 2022, p. 4). Por otra parte, Cas9 es una endonucleasa asociada a los CRISPR, conocida por actuar como “tijeras moleculares”, que corta y edita, en una célula, el ADN asociado a una enfermedad. Un ARN guía dirige las Cas9 al lugar exacto de la mutación en cuestión (Bayer, 2022).

En ese sentido, la tecnología *CRISPR-Cas9* ha despertado interés en la comunidad científica en lo que respecta a la prevención y tratamiento de enfermedades humanas, sin embargo, hasta los momentos sólo se han hecho ediciones de genoma en células animales en laboratorios para el estudio de ciertas enfermedades. Aún se están realizando investigaciones para determinar la aplicabilidad de este enfoque en seres humanos. Además, se debe considerar que las ediciones de genoma se han realizado sólo en células somáticas, las cuales son distintas a las células sexuales (óvulos y espermatozoides), cuyos cambios pueden transmitirse a generaciones posteriores, trayendo en consecuencia implicaciones de orden ético y de seguridad. En virtud de lo anterior, la edición del genoma de células germinales y del embrión es actualmente ilegal en los Estados Unidos y muchos otros países (Plus, 2022).

Biología sintética

Es la disciplina que tiene por objeto la ingeniería para la creación de nuevos sistemas biológicos no existentes en la naturaleza a partir de la manipulación de estructuras genéticas para perfeccionar procesos o funciones vitales y, a su vez, obtener productos de interés para el ser humano. La biología sintética surge a raíz del desarrollo de nuevas técnicas orientadas hacia evolución, adaptación e interacción entre los organismos existentes. En virtud de lo anterior, la biología sintética permite el diseño y construcción de sistemas biológicos nuevos con mejores cualidades, o en su defecto, el mejoramiento de elementos biológicos ya existentes con nuevos atributos. Para que un sistema biológico sintético se considere como tal, se deben cumplir estrictamente las siguientes características (Muñoz-Miranda et al., 2019, p. 3):

1. Ser predecible a nivel computacional.
2. Deben ser medibles.
3. Controlables.
4. Transformables (adicionar funciones y/o regular funciones existentes).

La biología sintética se apoya en la cooperación con otras áreas del saber tales como la química, la física, la computación, la estadística, entre otras, lo que da lugar a la generación de productos de vanguardia. No obstante, a pesar de ser en principio tecnología innovadora y adaptativa, puede acarrear riesgos e implicaciones a nivel económico, ambiental, ético y legal.

La biología sintética ha permitido la generación de productos gracias a los avances de la ingeniería genética y sus aplicación se circunscribe a los campos de la farmacéutica, la química, agricultura y la generación de energía. Según United Nations Environment Program (UNEP, por sus siglas en inglés), se ha propuesto colocar organismos genéticamente modificados en el medio ambiente con el fin de alterar permanentemente poblaciones de especies para erradicar vectores de enfermedades, eliminar especies invasoras, y ayudar a plantas y animales amenazados a aumentar su fortaleza y adaptabilidad (UNEP, 2019).

Particularmente, en el campo de la farmacéutica uno de los trabajos ha consistido en la manipulación de levaduras para la obtención de insulina, o la artemisinina, un fármaco para el tratamiento del paludismo (GreenFacts, 2015). Además, en el año 2015, William C. Campbell, Satoshi Ōmura y Youyou Tu obtuvieron el premio Nobel de medicina por la síntesis de una droga antimalárica, modificando la regulación de la vía del mevalonato mediante la introducción de doce genes de *Artemisia annua* en la levadura *S. cerevisiae* (Muñoz-Miranda et al., 2019). Por otra parte, en el área energética, uno de los resultados obtenidos consiste en la reescritura del código genético de la *Escherichia coli* con el objeto de transformarlos en generadores minúsculos de biocombustible.

Biochips

Son dispositivos cuyo principio de funcionamiento se basa en semiconductores que contienen información genética y son ampliamente utilizados en las ciencias biológicas. El biochip se fundamenta en la inmovilización de material biológico, sobre una superficie sólida para realizar un ensayo de afinidad entre el material inmovilizado *sonda* y el material de muestra *blanco* (Hermoso, 2005). Los biochips constan de millones de sensores individuales y otros componentes electrónicos para decodificar genes, y a su vez estructurar material biológico a través de un chip de ADN (gen), un chip de proteína o un chip biosensor (Rodríguez y Vargas, 2019). Los biochips son usados para detectar y medir elementos biológicos, permitiendo a los investigadores determinar la cantidad de moléculas en muestras.

Los biochips tienen una amplia aplicación en los análisis biomédicos tales como la imagenología, diagnósticos y tratamientos de enfermedades. Los biochips pueden capturar imágenes a una resolución mucho más alta, lo que permite a los investigadores ver detalles imposibles de detectar por las técnicas de imagen convencionales. Esto resulta ser crucial para estudiar estructuras pequeñas como células o proteínas (Frackiewicz, 2023). En la actualidad se han logrado avances notables con el uso de biochips tales como los denominados laboratorios en un chip (*Lab-on-a-chip* o su acrónimo en inglés LOC), los cuales consisten en dispositivos a escala micrométrica que tienen por objeto la identificación de elementos bioquímicos, control de mezclas a escala de picolitros (10^{-12} litros), detección de actividad de proteínas y otras moléculas. Además, otro elemento de vanguardia es el órgano en un chip (*organs-on-chips*), el cual se concibe como un sistema biométrico que tienen como función principal lograr el mantenimiento de la unidad funcional de un órgano vivo en una estructura tridimensional (3D) (Macías, 2016).

Principales retos

Sin embargo, la biotecnología y su herramienta emblemática: la edición de genes, plantea para la humanidad una serie de desafíos a superar, por ejemplo (Doudna, 2022):

1. Garantizar la no monopolización por parte de las grandes corporaciones tecnológicas de los beneficios de la tecnología.
2. Garantizar el acceso y la distribución equitativa de los recursos genéticos superando las atribuciones de propiedad intelectual.
3. Desarrollar las habilidades tecnocientíficas necesarias en genética.
4. Conservar el germoplasma antiguo y mantener el entorno natural inalterado.
5. Garantizar los derechos o bienestar de los animales.
6. Evitar el uso de la selección direccional para otros fines.

7. Identificar los peligros potenciales sobre el medio ambiente, la biodiversidad y la salud humana antes de la comercialización de nuevos productos modificados genéticamente.
8. Apoyar la diversidad de cultivos, particularmente variedades desatendidas.
9. Crear los métodos adecuados para evaluar la calidad de los productos editados genéticamente de manera que garanticen la seguridad alimentaria y la nutrición.
10. Desarrollar el marco legal para la regulación sanitaria y fitosanitaria.
11. Identificar el impacto de la bioeconomía.
12. La aceptación pública.
13. Costos y tiempo de desarrollo.

Ciertamente, la creación de un producto biotecnológico resulta en un proceso complejo que requiere:

1. Una amplia gama de conocimientos y habilidades en ingeniería genética, biología molecular, microbiología, nanotecnología y bioquímica.
2. Formación de ideas y descubrimientos científicos.
3. Investigación y desarrollo para validar la idea y convertirla en un producto viable.
4. Ensayos clínicos que puede llevar varios años para evaluar su seguridad y eficacia.
5. Largo proceso de regulación por parte de las autoridades sanitarias para su uso y/o comercialización.
6. Gran cantidad de capital o necesidad de financiación.
7. Acceso a instalaciones de laboratorio y equipos especializados para llevar a cabo su investigación y desarrollo.
8. Asumir los riesgos de que el producto no sea eficaz o seguro.

Asimismo, la selección direccional o artificial, presenta una serie de desafíos éticos y sociales sobre los cuales se deben reflexionar:

1. La posibilidad de que cultivos más productivos y resistentes a las plagas, queden concentrados en un pequeño número de corporaciones agroindustriales, aumentando la desigualdad y dificultando el acceso de los pequeños agricultores al mercado agrícola.

2. Provocar cambios inesperados en el medio ambiente que resultarían en la aparición de nuevas plagas, enfermedades o especies exóticas invasoras a causa de la alteración de las características genéticas de los organismos.
3. Aunque puede ser una declaración muy futurista, podría utilizarse para crear una nueva clase de individuos que sean genéticamente superior – aumentando su inteligencia o fuerza física – al resto de la población.
4. Puede conducir al desarrollo de una nueva forma de vida no humana, por ejemplo, biobots – robots creados a partir de células – con consecuencias inimaginables para la humanidad.
5. Causar la pérdida de diversidad genética debido a que al seleccionar organismos con ciertas propiedades deseadas – por la competencia de espacio y recursos energéticos – podrían estar eliminando o disminuyendo a los organismos con características evolutivas no deseadas.
6. Puede conducir a la creación de organismos con rasgos no deseados. Al seleccionar las características deseadas en unos organismos, puede ser que no se controle sus rasgos no deseados.
7. Crear organismos genéticamente modificados que no existen en la naturaleza, puede plantear preocupaciones sobre su seguridad y ética.
8. Crear organismos para cumplir con ciertos propósitos. Podría conducir a una situación en la que los organismos sean tratados como objetos, en lugar de seres vivos.

Otro aspecto a considerar es el potencial armamentístico de la biotecnológica, es decir, el uso de biomateriales para desarrollar nuevos reactivos para explosivos, por tanto existe un riesgo latente para la seguridad nacional, en tal sentido se hace necesario consolidar un programa de biodefensa para abordar el peligro del uso deliberado de armas biotecnológicas contra poblaciones. Asimismo, el ADN de un individuo se puede utilizar para evaluar sus puntos débiles y utilizar esta información en su contra (Marler y Gerstein, 2022). Aunque pueda parecer una distopía, la guerra en el futuro se podría estar definiendo en términos biológicos, con soldados mejorados mediante tecnologías cyborg, interfaz cerebro-computadora y reingeniería genética (Russell, 1990). En efecto, este tipo de tecnología cambiará sustancialmente la forma en que se defiende un país. Por ejemplo, el uso de sensores de base biológica adheridos al cuerpo, transformarán la forma en que el ejército monitorea a sus combatientes (DiEuliis et al., 2022).

En resumen, la biotecnología es una tecnología que tiene el potencial de mejorar a la sociedad humana en todos sus aspectos. Sin embargo, es importante reconocer que existen un conjunto de desafíos éticos y sociales por comprender y superar con éxito. Es fundamental trabajar en sistemas éticos y legales que permitan garantizar que la tecnología se utilice de manera responsable y segura para el bien común de la humanidad y del planeta.

El biotecnocapitalismo: la mercantilización de la bios

El biotecnocapitalismo se puede entender como la aplicación de la biotecnología a las actividades económicas. Naturalmente, las primeras investigaciones en biotecnología se dieron en el ámbito académico y con aplicaciones en la biología, la salud y agricultura. A partir de la década de los noventa del siglo XX, inició un gran interés y una fuerte inversión en investigación y desarrollo por parte de grandes corporaciones semilleras, químicas y farmacéuticas, entre las cuales se encuentran: *Syngenta, Monsanto, Dow Chemical Company, BASF, DuPont Corporation, Bayer, Roche y Pfizer*. En general, las principales corporaciones biotecnológicas del mundo están ubicadas en los Estados Unidos y Europa. Estas empresas tienen un gran impacto en la economía mundial, no solo desarrollan, producen y comercializan productos biotecnológicos (medicamentos, alimentos, productos farmacéuticos, productos industriales y otros productos basados en la biología) sino también la explotación de patentes, métodos o modelos (Bisang et al., 2009). Por supuesto, el capitalismo se interesa por la biotecnología por dos razones básicamente: i) su potencial de generar nuevos productos y servicios con un alto valor económico y ii) posible reducción de costos.

Ahora bien, las grandes corporaciones biotecnológicas buscan consolidar su monopolio en los sectores agrícolas y farmacéutico, desde la producción y distribución de semillas/herbicidas hasta la creación y comercialización de medicamentos/vacunas. Para lograr su objetivo, adoptan más de una estrategia que consisten en:

1. La compra a nivel internacional de empresas de semillas y sus canales de comercialización.
2. Fusiones y adquisiciones o convenios con la industria química, farmacéutica y afines.
3. Alianzas con universidades y sus institutos de investigación.
4. Financiación de las operaciones a pequeños y medianos productores agrícolas.

A través de esta serie de acciones, las megacorporaciones logran: i) la internacionalización; ii) el control de la tecnología y el conocimiento genético a través de la posesión o patente del gen (levaduras, fermentos, enzimas, proteínas), los métodos de selección y reproducción de nuevas variedades genéticas; iii) la introducción y expansión de las semillas genéticamente modificadas; iv) condicionar a los agricultores al consumo de determinados agroquímicos asociados con las semillas transgénicas y al uso de nuevas técnicas basadas en cultivos transgénicos; v) establecer la fidelización del consumo; vi) impulsar la demanda de nuevos productos y/o procesos; vii) territorialidad a través del desarrollo local de nuevas variedades de soja, maíz, algodón entre otras; ix) potenciar los desarrollos preexistentes; x) proteínas recombinantes con aplicaciones biomédicas o terapéuticas (Bisang et al., 2009).

En términos generales, las megacorporaciones de la biotecnología se dividen en dos categorías principales: 1) empresas de biotecnología agrícola centradas en el desarrollo y

la comercialización de cultivos genéticamente modificados, agroquímicos y otros productos para la agricultura (Ejemplo: *Bayer, Dow Chemical Company, Dupont corporation, Syngenta, Monsanto*); 2) Empresas de biotecnología médica dedicadas al desarrollo y la comercialización de medicamentos y tratamientos biotecnológicos (Por ejemplo: *Pfizer, Roche, Novartis, Johnson & Johnson*).

Además, las megacorporaciones de la biotecnología son actores importantes en la economía global y en la sociedad. Estas empresas tienen un gran impacto en la economía mundial, por ejemplo, en el año 2022, a pesar de una leve disminución en los ingresos en el campo de la biotecnología médica, se mantuvo una trayectoria de crecimiento estable, pudiendo recaudar 54.600 millones de dólares de inversión anual. En la actualidad, existe más de una decena de productos biológicos patentados que representan más de 145 mil millones de dólares en el mercado mundial de tecnologías médicas. Adicionalmente, en el transcurso de 2022 se firmaron acuerdos de alianza entre empresas vinculadas al área de la biología, por un valor potencial de 132.100 millones de dólares. Por otro lado, la innovación biofarmacéutica espera la aprobación de más de un millar de candidatos a fármacos activos, modalidades terapéuticas, nuevas terapias celulares y genéticas, nuevos productos desarrollados a través de plataformas de ARNm, nuevos radiofármacos y conjugados anticuerpo-fármaco (Ernst & Young, 2022).

En cuanto al campo de la biotecnología agrícola, el tamaño de mercado a nivel mundial, alcanzó la cifra de 93.100 millones de dólares en 2021 y se proyecta que logre 214.600 millones de dólares en 2031, creciendo a una tasa compuesta anual próxima al 9% entre los años 2022 y 2031. El mercado de biotecnología agrícola comprende la producción y comercialización de semillas híbridas, cultivos transgénicos, biopesticidas y biofertilizantes. Los principales actores son *KWS SAAT SE & Co, Merck KGaA, ChemChina, Bayer AG, Corteva, Nufarm, Limagrain, Mitsui & Co., Evogene Ltd., Valent BioSciences LLC. y Marrone Bio Innovations* (Supriya y Vitika, 2023).

Además de la agricultura y la medicina, las megacorporaciones de la biotecnología están activas en otras industrias. Por ejemplo, están desarrollando nuevas fuentes de energía renovable, como el biocombustible y biomateriales. Es importante señalar que en el campo industrial, existe un término conocido como biotecnología blanca, referido al uso de enzimas y microorganismos en la producción de alimentos, medicamentos, detergentes, papel y pulpa, textiles y bioenergía. El mercado global de la biotecnología blanca tuvo un caudal de 641.680 millones de dólares en el 2020 y se proyecta un aumento del 15% para el quinquenio 2021 – 2026. Dentro de los principales actores se encuentran: *Eucodis Bioscience GMBH, DuPont, Koninklijke DSM NV, BASF SE y Evonik Industries AG* (Mordor Intelligence, 2023).

Es importante señalar que en la actualidad, las Big Tech – en alianza estratégica con el sector académico, agrícola y biofarmacéutica – están incursionando en el sector de la biotecnología. Por ejemplo, *Microsoft* a través de su plataforma *Azure* ofrece sus modelos

de inteligencia artificial (IA) y computación en la nube para el análisis y secuenciación del genoma. Asimismo, *Alphabet* por intermedio de su división de investigación de ciencias biológicas, *Verily*, busca el desarrollo de nuevos fármacos basados en la genética y genómica. En *IBM Research*, llevan a cabo investigaciones en inmunoterapia con la ayuda de IA, genómica funcional e ingeniería celular. Del mismo modo, *GE Research* buscan desarrollar soluciones tecnológicas para la industria biomédica mediante el uso de biología molecular, celular y computacional, bioquímica y química sintética. Aunque es corta la lista presentada de las grandes corporaciones tecnológicas, sin embargo, demuestra la magnitud de la importancia que tiene los casos de uso de la biotecnología no sólo dentro del sector agrícola y/o farmacéutico.

Indudablemente, la biotecnología se constituye como un pilar fundamental en la economía y el sector tecnológico, por tanto no es fortuito que en la última década, las invenciones o innovaciones en ese campo de ciencias de la vida se hayan incrementado, representando uno de los primeros sectores técnicos en realizar solicitudes de patentes en la Oficina Europea de Patentes (OEP). La mayor cantidad de solicitud de patentes proceden de empresas privadas en su mayoría estadounidenses y europeas, el resto de las solicitudes la realizan institutos científicos y universidades. Por ejemplo, los principales solicitantes son *Hoffmann-La Roche* (155 patentes); *Institut national de la santé et de la recherche médicale* (76 patentes); *University of California* (71 patentes), *Novozymes* (64 patentes); *CJ CheilJedang* (64 patentes); *BASF* (61 patentes); *Sanofi* (60 patentes); *Johnson & Johnson* (53 patentes); *Regeneron Pharmaceuticals* (51 patentes) y *Amgen* (45 patentes) (European Patent Office, 2022).

Claramente, las megacorporaciones de la biotecnología y las Big Tech tienen los recursos necesarios para llevar a cabo proyectos de investigación complejos y costosos, por tanto están jugando un papel importante en el desarrollo de nuevas tecnologías además que son actores importantes en la economía mundial. Algunas de las principales áreas de investigación y desarrollo son: cultivos genéticamente modificados, nuevos tratamientos médicos para enfermedades genéticas, nuevas fuentes de energía renovable y nuevos materiales como los biomateriales. Por supuesto, plantean un conjunto de desafíos éticos y sociales relacionados con la concentración de poder económico y político, dependencia tecnológica, promoción de cultivos genéticamente modificados bajo la excusa del cambio climático, uso estratégico de los alimentos y medicamentos con fines de control masivo, posibles impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana y la equidad en el acceso a los avances en biotecnología. Por ende, es fundamental obligar a estas empresas a trabajar de manera responsable y transparente para garantizar que las tecnologías biológicas se utilicen de manera segura y ética.

Para finalizar, el biotecnocapitalismo es una tendencia del capitalismo que está en rápido auge debido a los avances en biología molecular y en tecnologías disruptivas. Asimismo, plantea una serie de desafíos, como la monopolización de la tecnología, riesgos de soberanía y seguridad alimentaria e implicaciones éticas y ecológicas.

Reflexiones finales

Desde el uso de cultivos transgénicos para la producción de alimentos resistentes a las plagas y a condiciones climáticas adversas, hasta la producción de medicamentos que pueden tratar enfermedades crónicas o graves. Pasando por la innovación en la industria textil, mediante la creación de fibras artificiales y tintes biológicos, así como la restauración de la naturaleza, mediante la creación de microorganismos genéticamente modificados para limpiar aguas subterráneas y suelos contaminados por compuestos tóxicos, la biotecnología – y su explotación económica – es todavía un campo emergente y prometedor.

Sin embargo, se hace necesaria y oportuna la reflexión sobre el potencial riesgo de la biotecnología en los siguientes aspectos: 1) la alteración del genoma humano; 2) los derechos humanos y de los animales; 3) la falta de certeza o de estudios científicos sobre sus efectos a largo plazo en los ecosistemas y sus cadenas tróficas; 4) creación de nuevas formas de vida; 5) efectos negativos desconocidos o no deseados en la salud humana; 6) uso con fines militares o destructivos; 7) la propiedad intelectual y la distribución equitativa de los beneficios de los descubrimientos e innovaciones; 8) la soberanía de los países en sus recursos naturales y culturales puede ser afectada por las megacorporaciones que dominan la investigación y el desarrollo de la biotecnología.

Al respecto, en la actualidad el desarrollo de la biotecnología moderna está muy relacionada con las *Big tech* y *Big pharma*, principales impulsoras e inversionistas en ese área de la ciencias de la vida. El monopolio, la posible falta de transparencia y responsabilidad junto con una fuerte inversión mil millonaria en la investigación en este campo, permite a las megacorporaciones tener una gran influencia, ventaja competitiva y dominio en el mercado global de los alimentos y medicamentos, obteniendo como consecuencia grandes beneficios económicos además del poder de persuasión en la toma de decisiones en instituciones gubernamentales, pudiendo imponer sus intereses económicos y políticos sobre los países, generar dependencia tecnológica y vulnerabilidad en la seguridad alimentaria y en los sistemas sanitarios.

En ese sentido, la metáfora de la espada de Damocles puede ser relevante para ilustrar la analogía de la no neutralidad de la tecnología y el poder de las grandes corporaciones. Por ejemplo, la espada simboliza el potencial de la tecnología para causar daño, mientras que el rey Dionisio representa a las *Big tech* y *Big pharma* que controlan la tecnología, que más allá de tener un impacto significativo en la humanidad, pueden promover la injusticia, la opresión o el sometimiento en el ser humano.

Por tanto, no se puede subestimar la importancia del desarrollo de la biotecnología por parte de las megacorporaciones. En tal sentido, a medida que continúa su avance, se hace necesaria que exista y se cumpla una regulación o marco legal que asegure el uso responsable y ético de la biotecnología tanto a nivel local de cada país así como en el ámbito internacional,

de manera que afiance su desarrollo sostenible y por ende el bienestar común de la humanidad. Por supuesto, es fundamental el fomento de la educación y la creación de conciencia sobre sus alcances y potenciales riesgos tanto en la academia como en la población en general, así como el diálogo entre las comunidades, corporaciones tecnológicas y entes gubernamentales, la participación pública en la toma de las decisiones que se planteen en el desarrollo de este campo, de forma tal que aseguren soluciones que respondan a las necesidades y demandas sociales.

Ahora bien, cada país debe asumir el reto del desarrollo de la biotecnología según sus capacidades y necesidades. Indudablemente, el desafío es muy grande porque se requiere grandes inversiones financieras, además de trabajar al unísono, científicos, tecnólogos, industriales, entes gubernamentales y las comunidades. El conocimiento libre y la colaboración son fundamentales para llevar a cabo las investigaciones necesarias que contribuyan a erradicar la enfermedad y la inseguridad alimentaria. Por ejemplo, una de las acciones que se pueden promover para reducir los costes, compartir experiencias, conocimientos, información y recursos, acelerar el proceso de investigación y desarrollo, es el modelo de innovación abierta a través del uso de plataformas digitales que permita la colaboración entre diferentes actores (universidades, laboratorios de investigación, laboratorios industriales, gobierno, comunidades) de modo que pueden facilitar el desarrollo de soluciones biotecnológicas que se encuentren más allá del beneficio comercial y se fundamenten en satisfacer necesidades reales de la humanidad, en un planeta que ya supera los ocho mil millones de personas, que demanda cada vez más recursos alimenticios y energéticos, bajo el marco de un cambio climático en ciernes.

Para finalizar, solo a través de la educación de la población sobre los potenciales beneficios y riesgos de la biotecnología, estableciendo un marco regulatorio sobre su desarrollo y uso, se puede garantizar que esta tecnología emergente se utilice de forma segura y responsable por el bien común, evitando que la espada de Damocles caiga sobre la cabeza de la humanidad.

Referencias

- Barney, N. y Lewis, S. (2022). *Biotechnology (biotech)*. TechTarget.
- Bayer. (2022). *¿Qué es la tecnología CRISPR?* <https://www.bayer.com/es/es/blog/espana-que-es-la-tecnologia-crispr>
- Beckman, C. (2023). *¿Cuál es la diferencia entre CRISPR y ZFN (nucleasas dedo de cinc)?* <https://www.beckman.mx/support/faq/research/crispr-zfns-difference>
- Bisang, R., Campi, M. y Cesa, V. (2009). *Biotecnología y desarrollo*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/3650/S2009064_es.pdf

- DiEuliis, D., Emanuel, P. y Feeney, B. (2022). *Study Predicts BioTech's Long-Term Impact on Defense*. National defense magazine. <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2022/8/1/study-predicts-biotechs-long-term-impact-on-defense>
- Doudna, J. (2022). La promesa de CRISPR para la seguridad alimentaria. En Food y A. O. of the United Nations (Eds.), *Gene editing and agrifood systems*. <https://doi.org/10.4060/cc3579en>
- Ernst & Young. (2022). How do biotechs stay the course in uncharted waters? *Beyond borders: EY biotechnology report 2023*. EY. <https://acortar.link/9ZdbEd>
- Espinosa, P. (2021). *Funcionamiento y aplicaciones de las nuevas técnicas de edición genética*. Fundación Antama. https://fundacion-antama.org/funcionamiento-y-aplicaciones-de-las-nuevas-tecnicas-de-edicion-genetica/#_ftn2
- European Patent Office. (2022). *European patent applications*. <https://acortar.link/XGwxSE>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *Gene editing and agrifood systems*. United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc3579en>
- Frackiewicz, M. (2023). *Biochips para imágenes y análisis biomédicos*. TS2. <https://ts2.space/es/biochips-para-imagenes-y-analisis-biomedicos/>
- Garrido, C. y Puche, P. (2018). *La ruleta rusa y la espada de Damocles del amianto, dos metáforas para un material con el que se asesina*. Sin Permiso. <https://acortar.link/4Bov3u>
- GreenFacts. (2015). *Biología sintética*. <https://copublications.greenfacts.org/es/biologia-sintetica/index.htm>
- Hermoso, A. (2005). *La industria del biochip*. Técnica Industrial 257. <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/17/36/a36.pdf>
- Iberdrola. (2015). *Modificación genética. CRISPR: la gran revolución genética*. <https://www.iberdrola.com/innovacion/modificacion-genetica-crispr>
- Infante-López, D., Céspedes-Galvis, M. y Flórez, Á. (2022). CRISPR-CAS9: el debate bioético más allá de la línea germinal. *Revista Persona y Bioética*, 2(25), 1-18. <https://doi.org/10.5294/pebi.2021.25.2.9>
- Macías, M. (2016). De la ficción a la realidad: órganos-en-chips al Servicio de la Ciencia y la Medicina. *Revista Odontológica Mexicana*, 2(20), 74-76. <https://doi.org/10.1016/j.rodMex.2016.04.001>
- Marler, T. y Gerstein, D. (2022). *Biotechnology and today's warfighter*. RAND. <https://www.rand.org/blog/2022/10/biotechnology-and-todays-warfighter.html>
- Mordor Intelligence. (2023). *Mercado de biotecnología blanca: crecimiento, tendencias, impacto de COVID-19 y pronósticos (2023 - 2028)*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/white-biotech-market>
- Muñoz-Miranda, L., Higuera-Ciapara, I., Gschaedler-Mathis, A., Rodríguez-Zapata, L., Pereira-Santana, A. y Figueroa-Yáñez, L. (2019). Breve Descripción de la Biología Sintética y la Importancia de su Relación con otras Disciplinas. *Revista mexicana de ingeniería biomédica*, 1(40), e201808EE1. <https://doi.org/10.17488/rmib.40.1.9>

- Organization for Economic Cooperation and Development. (2005). *A framework for biotechnology statistics*. Secretary-General of the OECD. <https://www.oecd.org/sti/inno/34935605.pdf>
- Plus, M. (2022). *Biblioteca Nacional de Medicina de los EE. UU.*. <https://medlineplus.gov/spanish/genetica/entender/investigaciongenomica/ediciondelgenoma/>
- Rodríguez, W. y Vargas, J. (2019). Biochips, aplicaciones convencionales e innovación: Una revisión documental. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 2(7). <http://dx.doi.org/10.17081/invinno.7.2.3086>
- Russell, A. (1990). International Relations Theory, Biotechnology, and War. *Politics and the Life Sciences*, 1(9), 3-19. <https://www.jstor.org/stable/4235714>
- Supriya, B. y Vitika, V. (2023). *Agriculture biotech market*. Allied Market Research.
- UNEP. (2019). *¿La biología sintética favorece o amenaza la salud del planeta?* <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-biologia-sintetica-favorece-o-amenaza-la-salud-del-planeta>