



## *Mirror Biology: A New Management Model for Biosecurity*

### *Abstract:*

*Mirror biology, a discipline that seeks to create biomolecules and organisms that are mirror images of natural biological systems, presents significant risks for biosecurity, international security, and defense. If such organisms were to become technically feasible, they could evade human and animal immune systems, resist bacteriophages, and persist in the environment. This could lead to the displacement of natural species, disruption of ecosystems, impacts on agriculture and livestock, and the absence of effective treatments against them. The dual-use nature of these technologies further increases the threats, as advances in chiral synthesis and synthetic biology could be exploited to develop undetectable biological agents, with high environmental persistence or capable of selectively interfering with human biochemical pathways. The democratization of biotechnological tools, reduced costs, and expanded access to knowledge increase the likelihood that non-state actors or unsupervised individuals could manipulate these systems for illicit or negligent purposes. The lack of international governance constitutes an additional risk.*

*Regulatory differences between countries weaken the principles of precaution and prevention. For this reason, establishing global regulatory frameworks is proposed, inspired by the Asilomar Agreements and the Tianjin Guidelines, focusing on codes of conduct, strict oversight, and scientific transparency. The proposed measures include: a moratorium on the creation of self-replicating mirror organisms; comprehensive risk assessments; strengthened physical and biological biosecurity; limiting experiments; developing advanced detection and environmental monitoring systems; as well as international networks for cooperation and information sharing.*

### *Keywords:*

*Chirality, Mirror biology, Biosecurity, Biotechnology risk, Biotechnological risk, international regulation, moratorium.*

### **Cómo citar este documento:**

CIQUE MOYA, Alberto. *Biología espejo: Un nuevo modelo de gestión para la bioseguridad*. Documento de Opinión IEEE 79/2026.

## Introducción

Cuando el personaje de Alicia atraviesa el espejo, ingresa en un mundo diferente, donde todo parece familiar, pero funciona al revés; donde las imágenes especulares no son superponibles y donde hay peligros ocultos bajo una apariencia de similitud.

La elección de este párrafo introductorio no es fortuita, ya que los avances en biología sintética se encuentran actualmente en un punto de inflexión en el que debe reflexionarse cuidadosamente, dado su potencial impacto en la seguridad y la defensa, sobre el alcance y las implicaciones de avanzar en la investigación aprovechando la propiedad de la quiralidad<sup>1</sup>.

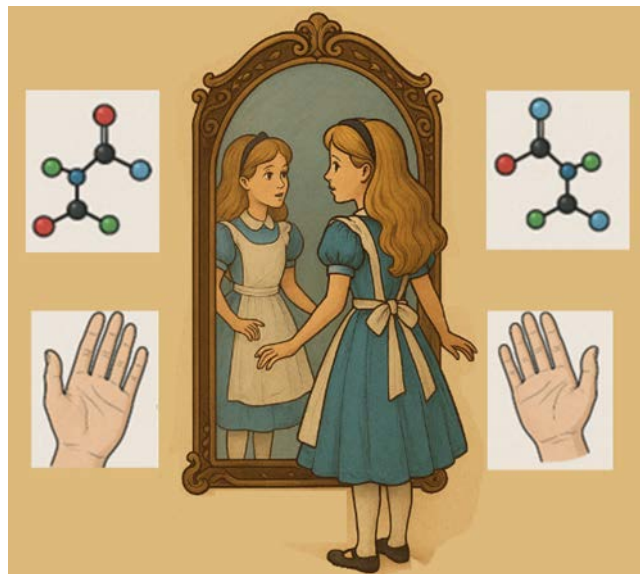


Figura 1. Imágenes especulares asociadas a la quiralidad

Esta propiedad, fundamental tanto en la química como en la biología, se refiere a la característica de ciertos objetos o biomoléculas, los denominados enantiómeros, que impide su superposición con su imagen especular; en otras palabras, no son idénticos a su reflejo.

---

Nota: Todos los accesos a internet se realizaron el 30 de marzo de 2026.

<sup>1</sup> La quiralidad es una propiedad geométrica de ciertas moléculas que no son superponibles con su imagen especular, es decir, existen en dos formas «espejo», llamadas enantiómeros (como la mano derecha y la izquierda) o lo que es lo mismo, son dos versiones orientadas en el espacio a manera de reflejo. Estas formas pueden tener las mismas propiedades químicas generales, pero difieren en cómo interactúan con otros sistemas quirales, como proteínas u otras biomoléculas. En biología, esto es importante porque muchos procesos (como la acción de enzimas o medicamentos) reconocen solo un enantiómero y no al otro, debido a la forma tridimensional específica de las moléculas.

Un ejemplo claro lo constituyen las manos de quien lee estas líneas: son casi iguales, pero es imposible colocar la mano derecha sobre la izquierda y lograr que coincidan perfectamente.

Los enantiómeros son pares de moléculas quirales que constituyen imágenes especulares entre sí, pero no pueden superponerse y, a pesar de tener la misma fórmula química y composición, la diferente distribución espacial de los átomos hace que presenten distinta actividad bioquímica (figura 1).

Esta propiedad tiene implicaciones relevantes en farmacología, especialmente porque algunas moléculas son quirales, lo que influye en cómo interactúan con otras moléculas y con el organismo.

Sirva de ejemplo que, en los medicamentos, una molécula «quiral» puede tener efectos beneficiosos, pero su imagen en espejo («enantiómero») podría no presentar los mismos efectos o incluso resultar perjudicial. Basta recordar la malhadada «talidomida» para corroborarlo: en este fármaco, un enantiómero calmaba los síntomas de las náuseas en mujeres gestantes (la forma R), mientras que el otro provocaba efectos teratogénicos en los bebés (la forma S)<sup>2,3,4</sup>.

Si en química la quiralidad es una propiedad clave, no lo es menos en biología, ya que muchos procesos metabólicos reconocen solo un enantiómero y no el otro. O lo que es lo mismo, nuestro organismo (al igual que el resto de los seres vivos), está «programado» para reconocer y responder solo a una de las dos versiones.

De hecho, la gran mayoría de las biomoléculas, como los aminoácidos y los azúcares vitales para la vida, presentan configuraciones quirales específicas; es decir, son «homoquirales», lo que significa que todas las biomoléculas con carácter quiral siguen la misma configuración, lo cual define su compatibilidad molecular y su funcionalidad en los seres vivos.

<sup>2</sup> MCBRIDE, W. G. «Thalidomide and congenital abnormalities», *The Lancet*, 278(7216)1358. 1961. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(61\)90927-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(61)90927-8)

<sup>3</sup> ZAFRA ANTA, M., & GARCÍA NIETO, V. M. «Síndrome de la Talidomida: Descubrimiento, tragedia y enseñanzas», *Pediatría Integral*, XXVI(4):259.e1-259.e9. 2022. Disponible en: [https://www.pediatriaintegral.es/wp-content/uploads/2022/06/Pediatría-Integral-XXVI-4\\_WEB.pdf](https://www.pediatriaintegral.es/wp-content/uploads/2022/06/Pediatría-Integral-XXVI-4_WEB.pdf)

<sup>4</sup> MARTÍNEZ-FRÍAS, M. L. «Talidomida: 50 años después», *Medicina Clínica*, 139(2):25-32. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2011.10.011>

La elección de esa marcada preferencia quiral es uno de los rasgos más enigmáticos y fundamentales del desarrollo de la vida en nuestro planeta, tal como la conocemos; por consiguiente, los ácidos nucleicos, en función de los azúcares que los componen, presentan una estructura dextrógira<sup>5</sup>, ya que los azúcares del ADN o del ARN que los integran adoptaron esa conformación (desoxirribosa y ribosa, respectivamente), circunstancia que afecta a la manera en que se metabolizan y son reconocidos en las rutas bioquímicas.

Por otro lado, los aminoácidos que conforman las proteínas son exclusivamente levógiros. Esta asimetría molecular, establecida en las primeras etapas de la evolución bioquímica, definió las bases estructurales y funcionales de todos los organismos existentes.

Sin embargo, desde una perspectiva teórica, nada impediría que la vida hubiera seguido el camino inverso: un mundo biológico «en espejo», donde los ácidos nucleicos fueran levógiros y los aminoácidos dextrógiros<sup>6,7</sup>.

La «elección» de este camino «hacia la izquierda», es decir, una biología «espejo» con azúcares L y aminoácidos D, habría desarrollado una bioquímica igualmente coherente y funcional, aunque completamente incompatible con la nuestra. La selección inicial de una conformación molecular sobre otra, probablemente resultado del azar, pero amplificado por mecanismos de autoorganización, selló el destino de la vida tal como la conocemos, recordándonos que la vida, en su esencia, pudo haber sido radicalmente distinta si la quiralidad primordial hubiera tomado la dirección opuesta<sup>8,9,10</sup>.

---

<sup>5</sup> Ser dextrógiro o levógiro se refiere a la dirección del giro de un objeto o sustancia. Desde otra aproximación, dextrógiro significa que gira o desvía la luz polarizada hacia la derecha (en el sentido de las agujas del reloj), mientras que levógiro significa que gira y desvía la luz hacia la izquierda (en sentido contrario a las agujas del reloj).

<sup>6</sup> CLINE, D. B. «On the physical origin of the homochirality of life», *European Review*, 13(Supp. No. 2):49-59. 2005. Doi: <https://doi.org/10.1017/S1062798705000657>

<sup>7</sup> WELLER, M. G. «The Mystery of Homochirality on Earth», *Life*, 14:341-353. 2004. Doi: <https://doi.org/10.3390/life14030341>

<sup>8</sup> DEVINSKY, F. «Chirality and the Origin of Life», *Symmetry*. 13:2277-2293. 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/sym13122277>

<sup>9</sup> GLOBUS, N., & BLANDFORD, R. D. «The Chiral Puzzle Of Life», *The Astrophysical Journal Letters*, 895(L11). 2020. Doi: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8dc6>

<sup>10</sup> CHIN, M. «Origin of life favors one 'hand' of chemical building blocks?», *UCLA* [pág. web]. 21 de noviembre de 2024. Disponible en: <https://newsroom.ucla.edu/releases/origin-of-life-favors-one-hand-of-chemical-building-blocks>

## Biología sintética y quiralidad

Los avances en las ciencias químicas, particularmente en el campo de la catálisis asimétrica (como pueden ser las reducciones asimétricas estequiométricas) y en el desarrollo de técnicas de separación como la cromatografía quiral, han permitido la obtención de compuestos enantiómericamente puros con una precisión sin precedentes<sup>11</sup>.

Estos progresos han revolucionado la síntesis de fármacos, agroquímicos y materiales funcionales, posibilitando diseñar moléculas con actividad biológica específica y mayor eficacia, ya sean insecticidas organoclorados como el  $\alpha$ -HCH ( $\alpha$ -hexaclorociclohexano) o antibióticos clave como los carbapenémicos o el levofloxacin<sup>12</sup>.

Sin embargo, el uso de compuestos quirales con una sola configuración enantiomérica no está exento de riesgos: diferencias mínimas en la orientación espacial de las moléculas pueden traducirse en efectos biológicos opuestos o incluso tóxicos, tal como se ha expuesto en el caso de la talidomida o, en el caso del glifosato y de algunos piretroides, en los que determinados enantiómeros presentan toxicidad y persistencia ambiental diferentes de las de sus pares quirales, acumulándose en seres vivos no objetivo y provocando un impacto medioambiental grave<sup>13,14</sup>.

Las ciencias biológicas también están experimentando esta revolución. En particular, la biología sintética se ha convertido en un campo que busca ir más allá de la química tradicional para crear y manipular sistemas biológicos artificiales.

Dentro de esta área ha surgido la llamada «biología espejo» (*mirror biology*), la cual explora la posibilidad de diseñar microorganismos o moléculas «invertidos», es decir, versiones reflejadas de las que existen en la naturaleza. Esta idea podría permitir fabricar

<sup>11</sup> NOYORI, R. *et al.* «Asymmetric hydrogenation of .beta.-keto carboxylic esters. A practical, purely chemical access to .beta.-hydroxy esters in high enantiomeric purity», *Journal of the American Chemical Society*, 109(19), 5855-5866. 1987. Doi: <https://doi.org/10.1021/ja00253a051>

<sup>12</sup> NOYORI, R. «Asymmetric Catalysis: Science and Opportunities (Nobel Lecture)», *Angewandte Chemie*, 41(12):2008-2022. 2002. Doi: [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020617\)41:12<2008::AID-ANIE2008>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020617)41:12<2008::AID-ANIE2008>3.0.CO;2-4)

<sup>13</sup> BOLTES ESPÍNOLA, A. K. «La quiralidad de los fármacos en sistemas biológicos de depuración, un problema más que abordar», *Madridblogs* [pág. web]. 22 de junio de 2018. Disponible en: <https://www.madridmasd.org/blogs/remtavares/2018/06/22/133669>

<sup>14</sup> BUSER, H. R. *et al.* «Environmental Behavior of the Chiral Acetamide Pesticide Metalaxyl: Enantioselective Degradation and Chiral Stability in Soil», *Environ. Sci. Technol.*, 36(2), 221-226. 2002. Doi: <https://doi.org/10.1021/es010134s>

células sintéticas formadas por componentes opuestos a los de la vida tal como la conocemos<sup>15</sup>.

La biología espejo pretende utilizar herramientas moleculares para construir biomoléculas y microorganismos compuestos por aminoácidos D y azúcares L, el reverso de la quiralidad natural, lo que abre la puerta a explorar la posibilidad de una vida basada en una quiralidad opuesta.

Esto permitirá, además de ayudar a entender por qué la vida eligió una configuración concreta, abrir nuevas oportunidades en biotecnología, medicina, agricultura, ganadería e incluso en el campo de la astrobiología, ya sea optimizar procesos metabólicos, mejorar la degradación de sustancias contaminantes o incluso crear sistemas «espejo» resistentes a los patógenos<sup>16,17,18</sup>.

Desde otra aproximación, así como Alicia descubre que el mundo detrás del espejo encierra peligros ocultos bajo una apariencia similar, el desarrollo de esta disciplina exige una reflexión prudente al plantearse profundas cuestiones éticas, de seguridad y de bioseguridad, ya que uno de sus fines es crear formas de vida paralelas y esta pretensión no es ajena a riesgos y amenazas.

Tal como plantearon en diciembre de 2024 treinta y ocho investigadores de nueve países, al publicar en la revista *Science* el artículo «Facing the risks of mirror life» (Enfrentar los riesgos de la vida en el espejo), se advertía a la sociedad en su conjunto sobre el peligro para toda la vida en la Tierra asociado a la creación de formas de vida «especulares», hasta que se comprendan plenamente sus riesgos.

---

<sup>15</sup> FRIESEN, S. «Mirror Life" is Still a Hypothetical. Here's Why it Should Probably Stay That Way», *Health University of Utah* [pág. web]. 12 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://healthcare.utah.edu/newsroom/news/2024/12/mirror-life-still-hypothetical-heres-why-it-should-probably-stay-way>

<sup>16</sup> HANDLEY, T. «Biología espejo: la ciencia que crea moléculas en reverso y divide a la comunidad científica», *gizmodo* [pág. web]. 12 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://es.gizmodo.com/biologia-espejo-la-ciencia-que-crea-moleculas-en-reverso-y-divide-a-la-comunidad-cientifica-2000193750>

<sup>17</sup> FRANCO-RODRÍGUEZ, F. C. *et al.* «Quiralidad en las ciencias naturales: un acercamiento a distintas escalas», *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 37(1):8-22. Doi: <http://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.01>

<sup>18</sup> RELMAN, D., & PARKINSON, J. «Understanding the Serious Risks, Potential Benefits Around the Mirror Life Concept», *ContagionLive* [pág. web]. 3 de agosto de 2025. Disponible en: <https://www.contagionlive.com/view/understanding-the-serious-risks-potential-benefits-around-the-mirror-life-concept>

Esta advertencia determina que afrontemos un escenario potencial en el que, gracias a la democratización del conocimiento, el abaratamiento de los costes y la optimización de los procesos, nos enfrentamos a nuevos desafíos en materia de bioseguridad, pero también, sin ninguna duda, de seguridad y defensa.

Sirva de ejemplo que, en caso de optimizarse las técnicas en desarrollo, una mínima inversión estructural podrá transformar una sustancia inocua en otra potencialmente peligrosa, capaz de alterar su comportamiento biológico o de escapar a los mecanismos naturales de control.

En este sentido, la síntesis avanzada de moléculas quirales plantea dilemas éticos en un contexto de investigación de uso dual susceptible de fines ilegítimos, ya se trate del desarrollo de armas químicas específicas que interfieran con rutas bioquímicas humanas de manera selectiva o, en el ámbito de la biología sintética, de la manipulación de la quiralidad en aminoácidos o azúcares, que podría alterar microorganismos con fines inciertos<sup>19</sup>.

El problema es que con el desarrollo de la denominada «biología espejo» es técnicamente factible modificar esa configuración en organismos, como puedan ser las bacterias.

Esta circunstancia puede provocar que estos «nuevos» organismos presenten un comportamiento diferente, lo que los convertiría, si así pudiera expresarse, en bacterias que pueden mantener su «forma» pero que cambian de manera total su comportamiento en la naturaleza.

Esta eventualidad ha hecho saltar las alarmas en el mundo científico ante esta posibilidad, lo que ha generado una llamada de atención a la sociedad en su conjunto

---

<sup>19</sup> VICIOSA, M. «Paren los experimentos»: el peligro (y los posibles usos) de las bacterias espejo», *Newtral* [pág. web]. 23 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.newtral.es/bacterias-espejo-peligros-quiralidad/20241223/>

para informar de los riesgos y amenazas asociados al desarrollo de esta nueva rama de la biología<sup>20,21</sup>.

No obstante, pese a lo expuesto anteriormente, la integración de esas nuevas biomoléculas, en el caso de que pudieran obtenerse, en una célula funcional requerirá el reensamblaje de todos los componentes con el fin de integrarlas de manera efectiva.

Este proceso incluiría la totalidad del sistema metabólico y el citoesqueleto, de modo que la célula resultante sea viable y pueda considerarse una célula viva en el sentido literal de la palabra, es decir, que posea capacidad de desarrollo y crecimiento.

### **Riesgos y amenazas de la biología espejo**

El principal riesgo de las denominadas «bacterias espejo», cuando se superen las barreras técnicas existentes, es que esos microorganismos sintetizados «*ex novo*», podrían evadir los sistemas inmunitarios de los seres vivos, ya que estos están adaptados a la conformación espacial «normal».

Además, esas bacterias podrían ser resistentes o no ser reconocidas por sus enemigos naturales (por ejemplo, los bacteriófagos), lo que podría provocar su persistencia ambiental, desplazar especies naturales y alterar ecosistemas.

Todo ello podría afectar a la agricultura y a la ganadería al no existir tratamientos efectivos frente a ellos<sup>22,23</sup>.

Desde el punto de vista de la seguridad y la defensa, estos riesgos y amenazas pueden intensificarse si la investigación se dirige con fines espurios en programas biológicos

---

<sup>20</sup> ROMERO, S. «Bacterias espejo: qué son y por qué representan una amenaza para la humanidad», *National Geographic España* (edición online). 28 de diciembre de 2024. Disponible en: [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/bacterias-espejo-que-son-y-por-que-representan-amenaza-para-humanidad\\_23945](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/bacterias-espejo-que-son-y-por-que-representan-amenaza-para-humanidad_23945)

<sup>21</sup> SANJURJO, B. «Qué es la biología espejo y cómo podría revolucionar los tratamientos del futuro», *Infobae* [pág. web]. 22 de septiembre de 2025. Disponible en: <https://www.infobae.com/salud/2025/09/22/que-es-la-biologia-espejo-y-como-podria-revolucionar-los-tratamientos-del-futuro/>

<sup>22</sup> FERNÁNDEZ AGUILAR, E. M. «Estos organismos sintéticos podrían poner en riesgo la vida tal como la conocemos: se llaman "bacterias espejo" y no pueden existir de forma natural», *Muy Interesante* [pág. web]. 13 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.muyinteresante.com/ciencia/peligro-bacterias-espejo.html>

<sup>23</sup> RADIO CANADÁ INTERNACIONAL. «Advierten que crear "células espejales" podría destruir la vida en la Tierra», *Radio Canadá Internacional* [pág. web]. 7 de enero de 2025. Disponible en: <https://ici.radio-canada.ca/rci/es/noticia/2131173/advierten-que-crear-celulas-espejales-podria-destruir-la-vida-en-la-tierra>

encubiertos, aprovechándose de la investigación de uso dual con el objetivo de desarrollar agentes biológicos indetectables, con alta persistencia ambiental, o frente a los cuales no haya tratamiento o vacuna.

Esto hace imprescindible analizar y mitigar los factores de riesgo asociados al desarrollo de la biología espejo con el fin de establecer las potenciales medidas de mitigación y control derivadas del gran potencial científico que tiene esta nueva disciplina<sup>24</sup>.

### ***Avance tecnológico acelerado en un entorno de ausencia de gobernanza internacional***

Dada la magnitud del riesgo, se subraya que el avance científico por sí solo no basta para garantizar la seguridad. Es necesario complementarlo con marcos normativos y medidas preventivas, entre ellas regulaciones internacionales y posibles moratorias, como sucede en el ámbito de la inteligencia artificial<sup>25</sup>.

Para ello, debe promoverse un diálogo público e interdisciplinar que incorpore dimensiones éticas, políticas, sociales y científicas, asegurando una transparencia total sobre los proyectos relacionados con biomoléculas y microorganismos especulares, antes de que la «vida espejo» sea técnicamente posible.

Ahora, cuando aún estamos a tiempo, dentro de ese horizonte temporal de diez años que haría posible la «vida espejo» y, por tanto, nos permita asistir al nacimiento de un nuevo árbol de la vida, tal como planteaba Adamala en su entrevista para Radio Canadá Internacional, anteriormente citada.

La regulación internacional resulta esencial, ya que las diferencias legales entre países pueden comprometer los «principios de precaución y prevención» y podría suceder que

---

<sup>24</sup> INGESSON, T., CHATTOPADHYAY, S. & GISSELSOON, D. «Large-Scale Nightmare or Precision Tool for Covert Operations? An Assessment of the Risks of Genetic Technology in the Near Future», *International Journal of Intelligence and Counterintelligence*, 1. 2025, pp. 1-30. [Doi: https://doi.org/10.1080/08850607.2025.2531921](https://doi.org/10.1080/08850607.2025.2531921)

<sup>25</sup> PAYO ,A. «La vida especular plantea riesgos invisibles para el equilibrio biológico», *SINC* [pág. web]. 10 de agosto de 2025. Disponible en: <https://www.agenciasinc.es/Reportajes/La-vida-especular-plantea-riesgos-invisibles-para-el-equilibrio-biologico>

estos no fueran suficientes ni eficaces para contrarrestar los riesgos a los que nos enfrentaríamos como consecuencia de lo anteriormente expuesto<sup>26,27</sup>.

Para mitigar los riesgos, se considera conveniente:

- Establecer marcos normativos para la biología espejo, inspirados en los Acuerdos de Asilomar y complementarios a instrumentos como las Directrices de Tianjin, mediante el establecimiento de códigos de conducta de los científicos, con el fin de detener o pausar las líneas de investigación dirigidas a crear «bacterias espejo», favorecer la transparencia científica y la colaboración, y evitar que los avances en biología sintética se realicen en entornos sin supervisión<sup>28,29</sup>.

Entre los aspectos más destacados de las Directrices de Tianjin se incluyen<sup>30</sup>:

- o Normas éticas y legales: uso responsable de la biociencia y respeto a las prohibiciones internacionales, evitando usos malintencionados. Para ello, resulta fundamental conocer y cumplir las leyes nacionales e internacionales en materia de investigación biológica, incluida la prohibición de las armas biológicas.
- o Gestión responsable de las investigaciones y fortalecimiento de la integridad científica de los investigadores, especialmente en lo relativo a la prevención de abusos, mediante el fomento de la integridad científica y la prevención de conductas indebidas.

<sup>26</sup> LANDA, C. «La Constitución y los Principios Ambientales de Precaución y Prevención», *Enfoque Derecho* (edición digital). 25 de mayo de 2017. Disponible en: <https://enfoquederecho.com/la-constitucion-y-los-principios-ambientales-de-precaucion-y-prevencion/>

<sup>27</sup> ORF, D. «38 científicos advierten que crear vida especular (o vida espejo) podría desatar una pandemia global y poner en peligro toda la humanidad», *Squire* [pág. web]. 21 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.esquire.com/es/ciencia/a63233416/celulas-espejo-podrian-ascabar-vida-tierra/>

<sup>28</sup> ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. *Informe revisado de la Reunión de Expertos de 2020 sobre el Examen de los Adelantos en la esfera de la Ciencia y la Tecnología relacionados con la Convención (BWC/MSP/2020/MX.2/2/Rev.1)*. *United Nations* [pág. web]. 26 de noviembre de 2021. Disponible en: <https://docs.un.org/es/BWC/MSP/2020/MX.2/2/Rev.1>

<sup>29</sup> EDITORIAL TEAM SDG 3. «Warnings rise over mirror life: Synthetic biology's new frontier and its global risks», *Global Society World News* [pág. web]. 21 de mayo de 2025. Disponible en: <https://www.globalsociety.earth/post/warnings-rise-over-mirror-life-synthetic-biology-s-new-frontier-and-its-global-risks>

<sup>30</sup> IAP SCIENCE, HEALTH, POLICY. «Directrices de Tianjin en materia de biocustodia para códigos de conducta de los científicos», *IAP Science, Health, Policy* [pág. web]. Julio 2021. Disponible en: <https://www.interacademies.org/sites/default/files/2021-12/2021%20TIANJIN%20BIOSECURITY%20GUIDELINES-Spanish.pdf>

- Formación y divulgación: capacitación continua y difusión equilibrada de resultados, minimizando los riesgos de uso indebido de estos. Implicación y cooperación internacionales.
- Los científicos deben fomentar la comprensión pública de la biociencia y colaborar internacionalmente para compartir las mejores prácticas y mitigar riesgos. Se pretende prevenir tanto el uso indebido intencionado como el daño no intencionado en la investigación biológica.
- Derivado de esos marcos normativos y/o códigos de conducta, se considera necesario establecer una moratoria que paralice los experimentos que busquen crear organismos autorreplicantes de «vida espejo» sin disponer de evaluaciones de riesgo completas ni de un consenso científico global.

Esa moratoria incluiría:

- Evaluaciones de riesgo y mejora de la bioseguridad, que incluyan medidas de contención física y protocolos de transporte adaptados para esta nueva categoría de riesgo.
- Fomento de buenas prácticas y contención biológica, evitando que estos organismos utilicen vectores transmisibles, de modo que solo puedan proliferar en huéspedes específicos.
- Prohibición de la clonación de estructuras especulares, especialmente en patógenos, así como de los experimentos a gran escala; los ensayos permitidos deberían emplear organismos incapaces de sobrevivir en ambientes naturales. Todo ello en un contexto de potenciar las medidas de biocustodia<sup>31,32</sup>.

---

<sup>31</sup> LARRIÓN, J. «Historia de las reuniones de Asilomar. Éxitos y fracasos de la autorregulación en las comunidades tecnocientíficas», *Sociología y tecnociencia. Revista digital de sociología del sistema tecnocientífico*, 1(1). 2011, pp. 63-82.

<sup>32</sup> BATTIFOGLIA, E. «Del ADN a la IA, la necesidad de una ciencia autorregulada», *ANSA Latina* [pág. web]. 22 de febrero de 2025. Disponible en: [https://www.ansalatina.com/americalatina/noticia/ciencia\\_y\\_tecnologia/2025/02/22/ansa-del-adn-a-la-ia-necesidad-de-ciencia-autorregulada\\_2d020046-fa4d-4f7c-aa00-2a563665d161.html](https://www.ansalatina.com/americalatina/noticia/ciencia_y_tecnologia/2025/02/22/ansa-del-adn-a-la-ia-necesidad-de-ciencia-autorregulada_2d020046-fa4d-4f7c-aa00-2a563665d161.html)

- Evaluación del coste-beneficio por parte de entidades públicas y privadas que apoyen este tipo de investigaciones, con la posibilidad de suspender la financiación si los riesgos superan los beneficios<sup>33</sup>.
- La moratoria debe prohibir la creación de organismos completos basados en biomoléculas especulares hasta que se comprendan plenamente sus riesgos, aunque no afectaría a investigaciones en biomoléculas especulares con fines terapéuticos o materiales, siempre que no impliquen autorreplicación.
- Declaración y evaluación obligatoria de avances, en caso de que las investigaciones no se paralicen, mientras no se establezca un marco regulado, tanto a nivel nacional como internacional, que garantice la confianza entre gobiernos, la sociedad y la comunidad científica.
- Fortalecer instrumentos internacionales como pudieran ser el Protocolo de Cartagena y la Convención sobre Armas Biológicas mediante mecanismos efectivos de verificación y control, así como actualizar los códigos penales para sancionar actividades prohibidas.

Finalmente, es prioritario que los inversores apliquen el principio de precaución cuando los riesgos superen a los beneficios, promoviendo una colaboración global que garantice el control universal y evite vacíos regulatorios, al tiempo que se informa a la sociedad sobre los riesgos y amenazas asociados.

### ***Riesgos de liberación ambiental y dificultades técnicas de detección***

Ante una posible «liberación accidental o deliberada» de compuestos o sistemas quirales no controlados, resulta necesario desarrollar tecnologías de detección y contención específicas para este tipo de compuestos o sistemas espejo, anticipando los posibles perjuicios que pudieran provocar en los seres vivos «objetivo», ya fuera evadiendo los mecanismos inmunitarios o alterando los controles ecológicos tradicionales.

---

<sup>33</sup> YANES, J. «Los científicos abandonan el sueño de crear 'vida espejo', que podría convertirse en pesadilla», *Diario El País* (edición digital). 4 de marzo de 2025. Disponible en: <https://elpais.com/ciencia/2025-03-04/los-cientificos-abandonan-el-sueno-de-crear-vida-espejo-que-podria-convertirse-en-pesadilla.html>

Este posible escenario determina la necesidad de potenciar las capacidades de detección e identificación de este tipo de agentes o sustancias, así como establecer redes colaborativas para compartir información.

De hecho, es importante destacar que la detección, identificación, monitorización y cuantificación de enantiómeros en mezclas (racémicas o no) tienen costes asociados elevados, lo que limita la capacidad de respuesta temprana y de vigilancia ambiental.

Además, requieren una formación técnica altamente especializada, circunstancia que debe tenerse en cuenta, ya que su refuerzo favorece la bioseguridad<sup>34</sup>.

En caso de disponer de estas técnicas de detección e identificación, sería conveniente desarrollar programas de monitorización ambiental para la detección de posibles enantiómeros tóxicos o compuestos quirales no controlados que se hayan liberado de manera accidental o deliberada, como consecuencia de la vulneración de las medidas de mitigación anteriormente descritas.

Lo anterior determina que sea necesario:

- Integrar esos sistemas avanzados de detección e identificación de biomoléculas espejo en las infraestructuras de bioseguridad y en los laboratorios de referencia, así como, si se considera oportuno, establecer programas de monitorización ambiental para detectar potenciales enantiómeros tóxicos.
- Asegurar que los sistemas de bioseguridad actuales (contención de laboratorio y protocolos de traslado de organismos) se adapten o se reformulen para esta nueva categoría de riesgo.
- Establecer redes colaborativas internacionales que compartan información y estándares técnicos.
- Financiar la investigación en tecnologías de detección rápida y cuantificación de enantiómeros en mezclas racémicas o no racémicas.

---

<sup>34</sup> GOVERNMENT OFFICE OF THE SCIENCE. «Research and analysis Mirror life», GovUK [pág. web]. 16 de julio de 2025. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/mirror-life/mirror-life?utm>

### ***Déficit de formación ética y de cultura de bioseguridad***

La insuficiente formación ética y en bioseguridad del personal investigador constituye un factor que agrava el riesgo y la amenaza de usos indebidos o negligentes.

Estos pueden verse motivados por la competitividad o por intereses personales, lo que podría llevar a minimizar las consecuencias de sus acciones, o incluso a trabajar sin supervisión en entornos no seguros.

Esta carencia en los aspectos deontológicos de su «profesión» provoca que, desde una aproximación egoísta y basada en la necesidad de incrementar el conocimiento, con el fin de pasar a la posteridad como quien alcanzó un hito sin precedentes en relación con la biología espejo, se olviden o se minimicen las consecuencias de sus actos. Sin olvidar aquellos individuos que con intereses espurios investigan sin ningún tipo de control en este nuevo campo del conocimiento.

Motivados por la competitividad o por intereses personales, algunos investigadores podrían minimizar las consecuencias de sus acciones o trabajar sin supervisión en entornos no seguros.

De ahí la importancia de definir límites claros en la investigación con biomoléculas especulares, diferenciando, tal como se plantea en este trabajo, entre el estudio con fines terapéuticos o materiales (considerados de bajo riesgo) y la creación de organismos vivos autorreplicantes (de alto riesgo)<sup>35</sup>.

Las medidas de mitigación propuestas incluyen:

- Con el fin de reducir estas posibles situaciones, resulta clave fortalecer la formación ética del personal investigador, con la esperanza de que se sientan tentados a participar en líneas de investigación de uso dual. Potenciar la ética del investigador resulta clave para reducir no solo los riesgos, sino también las amenazas asociadas a la investigación en entornos no seguros y no sujetos a control. Esta formación debe de plantearse en los niveles más básicos del proceso formativo del individuo.

---

<sup>35</sup> UNDHEIM, T. A. «The whack-a-mole governance challenge for AI-enabled synthetic biology: literature review and emerging frameworks», *arXiv*. 1 de febrero de 2024. Disponible en: <https://arxiv.org/pdf/2402.00312>

- Desde una aproximación convergente, resulta necesario capacitar al personal investigador y técnico en los riesgos asociados a la investigación quiral.
- Integrar en los desarrollos curriculares del personal investigador y técnico la educación en bioética, así como en bioseguridad, con el fin de promover una cultura global de seguridad y responsabilidad, mediante la incorporación de contenidos sobre los riesgos asociados a la investigación de «uso dual» y de responsabilidad científica en el campo de la investigación quiral.
- Esa formación en bioética y bioseguridad redundará en el fomento de la transparencia internacional y de la cooperación científica como pilares de confianza y control<sup>36,37</sup>.

## Conclusión

Los avances en la síntesis y el análisis de compuestos quirales han abierto oportunidades sin precedentes en la farmacología, la agroindustria o la nanotecnología. Sin embargo, estos avances también conllevan riesgos sanitarios, medioambientales y éticos que afectan a la seguridad, y que, si no se gestionan adecuadamente, pueden derivar en daños significativos.

La investigación en el campo de la quiralidad, aunque esencial para el progreso científico, implica riesgos y amenazas que van más allá de la investigación tradicional en química y biología sintética. Los ejemplos históricos muestran que el desconocimiento y la falta de control pueden provocar crisis sanitarias y daños irreversibles en el ambiente. Los avances en la producción y manipulación de compuestos quirales deben ir acompañados de una gestión responsable, marcos regulatorios sólidos y vigilancia internacional, con el fin de garantizar que el progreso no se convierta en amenaza, desde un enfoque preventivo y colaborativo.

---

<sup>36</sup> SAMPLE, I. «'Unprecedented risk' to life on Earth: Scientists call for halt on 'mirror life' microbe research», *The Guardian* (edición online). 12 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.theguardian.com/science/2024/dec/12/unprecedented-risk-to-life-on-earth-scientists-call-for-halt-on-mirror-life-microbe-research>

<sup>37</sup> PIPER, K. «A whole new thing that could end the world», *Vox* [pág web]. 3 de enero de 2025. Disponible en: <https://www.vox.com/future-perfect/393048/mirror-life-mirror-bacteria-existential-risk-science-biology-apocalypse>

La biología espejo abre un horizonte de grandes promesas, pero también de peligros sin precedentes. Aunque ofrece aplicaciones terapéuticas y científicas valiosas, su potencial para evadir defensas biológicas y alterar los ecosistemas hace imperativo actuar con cautela.

La ciencia y los gobiernos deben colaborar proactivamente para evitar que la frontera científica se convierta en una amenaza existencial.

La cooperación internacional y una regulación proactiva son esenciales para evitar que este avance científico se convierta en una amenaza global. De hecho, la frontera entre innovación y amenaza será cada vez más difusa sin una gobernanza adecuada.

*Alberto Cique Moya\**

*Coronel veterinario (R) – Servicio de Sanidad de la Guardia Civil  
Académico de número de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de España*