

NUEVAS ARMAS BIOLÓGICAS, ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS Y VULNERABILIDADES

TENIENTE CORONEL ALEXANDER BETZHOLD FORMIGLI¹

Resumen: *en la doctrina de defensa biológica, dentro del ámbito CBRN (chemical, biological, radiological and nuclear), ha aumentado la preocupación por el desarrollo de nuevos tipos de armas biológicas, a partir del uso de tecnologías emergentes de ingeniería genética, que vulneran los actuales sistemas de alerta, detección de amenazas, identificación de agentes y protocolos de la Convención de Armas Biológicas y Toxinas (BWC, Biological and Toxins Weapon Convention). En consecuencia, este artículo analiza las características de las tecnologías emergentes y su impacto en la defensa biológica militar, como elemento base para el desarrollo futuro de la Fuerza Terrestre, a partir de la brecha y vulnerabilidad descrita.*

Palabras clave: biológico, defensa, CBRN, genética, biotecnología.

Abstract: *Within the CBRN (chemical, biological, radiological, and nuclear) biological defense doctrine, there has been growing concern about the development of new types of biological weapons, based on the use of emerging genetic engineering technologies, which violate current warning systems, threat detection, agent identification, and protocols of the Biological and Toxins Weapon Convention (BWC). Consequently, this article analyzes the characteristics of emerging technologies and their impact on military biological defense, as a basic element for the future development of the Land Force, based on the gap and vulnerability described.*

Keywords: Biological, defence, CBRN, genetics, biotechnology.

INTRODUCCIÓN

Los avances en biotecnología y sus productos han generado una vulnerabilidad para las estrategias de prevención, detección y defensa contra nuevas armas biológicas diseñadas a partir de herramientas de uso científico y comercial.

1 Oficial del Servicio de Veterinaria del Ejército. Médico Veterinario (Universidad de Chile), Magister en Gestión y Planificación Ambiental (Universidad de Chile), Especialista CBRN (Deutsches Heer-ABC/SeS, US Marine Corps-CBIRF). Durante el año 2025 y parte del 2026 se desempeñó como jefe de la Sección Sanidad para la Docencia, de la Escuela de los Servicios del Ejército. Actualmente se encuentra en condición de retiro voluntario.

La inteligencia artificial ha permitido diseñar estructuras proteicas y secuencias de ácidos nucleicos, a partir del análisis de bases de datos genéticas, creando nuevos diseños que pueden ser fabricados en laboratorios.

Mediante técnicas de secuenciación y reconstrucción de material genético, se pueden diseñar patrones y reemplazar parte de los códigos genéticos, formando secuencias completas de agentes patógenos anteriormente erradicados, prohibidos y otros nuevos, inventados o de “diseño”.

Frente a estas nuevas armas biológicas sintéticas, los mecanismos de prevención y control de la Convención de Armas Biológicas y Toxinas (*BWC, Biological and Toxins Weapon Convention*), del año 1972, han quedado obsoletos y surge la necesidad de actualizar los protocolos de defensa biológica.

Lo anteriormente expuesto ha obligado a los Ejércitos de países miembros de la OTAN (Organización del Tratado del Atlántico Norte), a modernizar su doctrina CBRN (*Chemical, Biological, Radiological and Nuclear*), o de defensa química, biológica, radiológica y nuclear, específicamente en lo relacionado con la aparición de amenazas biológicas desconocidas, de origen natural o artificial, tal como fuera el caso de la pandemia de virus COVID-19 y la sospecha de resurgimiento de programas de armas biológicas.²

El presente artículo aborda las características de estas tecnologías emergentes, de las nuevas armas biológicas y describe alternativas de mecanismos de control.

DESARROLLO

Ingeniería genética y manipulación de agentes biológicos

Mediante ingeniería genética se pueden fabricar nuevas armas biológicas, mucho más efectivas que sus versiones originales en la naturaleza, creando bacterias resistentes a los antibióticos, ocultando antígenos de virus para el sistema inmune y logrando que las vacunas sean ineficaces contra nuevas cepas modificadas.³

Si bien el desarrollo “tradicional” de armas biológicas requiere de un programa de investigación secreto, con recursos y problemas complejos, tales como la obtención de cepas virulentas, la producción masiva de los agentes sin pérdida de patogenicidad y el desarrollo de un sistema

2 BETZHOLD, Alexander, “Innovación tecnológica en defensa biológica, análisis de doctrina y técnicas actuales”, Memorial del Ejército N° 516, julio 2025, Centro de Estudios e Investigaciones Militares (CESIM), Santiago, Chile, pp. 31-47. <https://ejercito.cl/descargas/desktop/NDg2Mg==>

3 VAN AKEN, Jan; HAMMOND, Edward. Genetic engineering and biological weapons. New technologies, desires and threats from biological research. EMBO Rep. 2003 Jun;4 Spec No (Suppl 1): S57-60.

de lanzamiento eficaz, los avances en biotecnología para la modificación de patógenos y la creación de otros nuevos permiten traspasar dichas barreras y producir armas biológicas en forma “innovadora”.⁴

Mediante “virología sintética”, cualquier virus cuyo ADN/ARN (ácido desoxirribonucleico/ribonucleico) esté disponible en bases de datos con códigos genéticos, puede potencialmente ser sometido a ingeniería inversa, poniendo de nuevo en circulación virus que ya han sido erradicados.⁵

La biología sintética, la nanotecnología y la manipulación de ADN permiten fabricar “patógenos de diseño”, reconstruyendo y modificando virus y bacterias para causar más daño, ser “invisibles” al sistema inmune y resistentes a vacunas (bacterias) y medicamentos de tratamiento viral (antivirales) o bacteriano (antibióticos).

Dentro del concepto de “guerra biológica”, existe también una subcategoría denominada “guerra entomológica”, que tiene dos campos de aplicación: uno donde los insectos pueden usarse directamente como armas para propagar patógenos y otro donde animales no insectoides (ratas, por ejemplo), son los utilizados para propagar los patógenos. Este tipo de guerra se estudió y aplicó sistemáticamente durante la Segunda Guerra Mundial, en especial por Japón, principalmente mediante la “Unit 731”, que infectó a las poblaciones chinas con pulgas portadoras de peste (bacteria *Yersinia pestis*); moscas que propagaban el cólera (bacteria *Vibrio cholerae*) y ratas que se criaron en grandes cantidades para usarlas como vectores. Después de la guerra, la Unión Soviética, entre otros, investigaron el empleo de garrapatas como vectores, al igual que en Estados Unidos se experimentó con éxito el uso de mosquitos y pulgas como vectores lanzados desde aviones.⁶

En la actualidad, los avances científicos han ampliado el alcance de la guerra entomológica, producto de las técnicas de modificación genética para mejorar las capacidades de los insectos como vectores de enfermedades o portadores de toxinas.

La edición genética con la herramienta CRISPR-Cas9,⁷ ha generado preocupación sobre el posible uso indebido para modificar insectos con fines ofensivos; además, la llegada de vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle - UAV*), equipados con drones del tamaño de insectos, podrían facilitar el lanzamiento selectivo de armas basadas en insectos, lo que plantea nuevos desafíos para la defensa y la seguridad, con ventajas estratégicas como el lan-

4 JULING, Dominik; Future Bioterror and Biowarfare Threats for NATO's Armed Forces until 2030. *Journal of Advanced Military Studies*, vol. 14, N° 1, Spring 2023, pp. 118-133

5 *Ibidem*.

6 *Ibidem*.

7 CRISPR-Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, associated protein 9), en español se traduce como repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas asociadas a la proteína 9. La proteína es una enzima o nucleasa que corta ADN.

zamiento selectivo e impactos significativos en las fuerzas enemigas, pero con problemas éticos y ambientales, como la liberación deliberada de insectos portadores de enfermedades que den lugar a epidemias incontrolables y a un sufrimiento generalizado entre las poblaciones civiles, sin distinción entre combatientes y no combatientes, desafiando principios fundamentales del derecho humanitario y moralidad.⁸

Proceso de diseño y fabricación de nuevas armas biológicas

Un informe de la RAND Corporation del año 2025,⁹ concluye que la “madurez” (consolidación) y difusión de un tipo de tecnología puede reducir las barreras para el desarrollo de armas biológicas, por parte de adversarios o terroristas, dependiendo del grado de avance científico, la demanda, las barreras regulatorias, el financiamiento y la accesibilidad pública.¹⁰

En dicho estudio, se modelaron los siguientes tres escenarios de riesgo:

- Modificación genética de un patógeno existente y accesible.
- Resurrección de un patógeno previamente existente o difícil de adquirir.
- Creación de un nuevo patógeno.

El estudio plantea que los ataques biológicos son el resultado de un proceso de varias etapas, que incluye la planificación del ataque, la adquisición de agentes biológicos, su uso como arma y su liberación. En este contexto, la adquisición de agentes biológicos puede ocurrir mediante compra, robo, desvío o producción.

La figura N° 1 muestra una representación simplificada de este proceso, basado en la adquisición de agentes biológicos mediante su producción, que parte con una etapa de “idea” (*Ideate*) y continúa con el “diseño” (*Design*), construcción o adquisición (*Build/acquire*), prueba o evaluación (*Test*), aprendizaje (*Learn*) y que si es exitoso avanza para “concentrar” y transformar en “arma” (*Concentrate/weaponize*), luego “liberar o dispersar” (*Release/disperse*) y finalmente obtener resultados o “consecuencias” (*Consequences*).¹¹

8 KHALIL, Abdelwahab; ABDELGAWAD, Shaimaa; EL-HAREEF, Aya, *et al.* “Insects as disease vectors: Historical and contemporary analysis of entomological warfare”. *Ambio, Journal of Environment and Society*, 07 June 2025, Sweden. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-025-02212-x#citeas>

9 RAND Corporation (cuyo nombre es una contracción en inglés Research and Development, que significa Investigación y Desarrollo). En uno de los Think Tank más influyentes del mundo, sobre todo en temas de defensa, estrategia y políticas públicas. RAND inventó conceptos que se usan en la actualidad, tales como: Teoría de juegos aplicada a la guerra fría, Wargames, “Escalada” y “Señales”, contrainsurgencia y guerra irregular, entre otros. Fue fundada el 14 de mayo de 1948.

10 DEL CASTELLO, Barbara; WILLIS, Henry; Assessing the Impacts of Technology Maturity and Diffusion on Malicious Biological Agent Development Capabilities: Demonstrating a Transparent, Repeatable Assessment Method, RAND Corporation, August 11, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3662-1.html

11 *Ibidem*.

Simplified Process for Biological Weapon Development

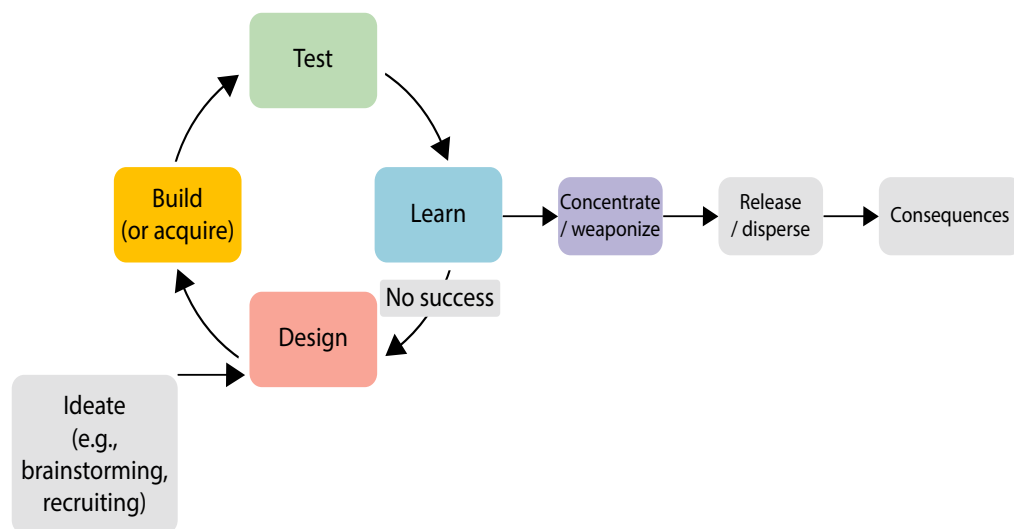


Figura N°1: Proceso simplificado de desarrollo de armas biológicas.

Fuente: DEL CASTELLO, Barbara; WILLIS, Henry, 2025, *op.cit.*

En el mismo estudio, se clasificaron las tecnologías emergentes según las etapas del proceso de fabricación de armas biológicas, ya sea en “construcción” (*Build*), “diseño” (*Design*), “evaluación o prueba” (*Test*) y “aprendizaje” (*Learn*).

La figura N° 2 representa esta clasificación de tecnologías emergentes, que corresponden a sintetizadores de sobremesa (*Benchtop Synthesizers*); la técnica *CRISPR-Cas9* (que se describe más adelante en este artículo); NGS (*Next-generation sequencing o secuenciadores de nueva generación*), la reacción en cadena de polimerasa (*PCR: Polymerase chain reaction*); tecnología de laboratorio en un chip (*Lab-on-a-chip*), que condensa procesos complejos de laboratorio en un chip de computadora para su automatización; modelos basados en inteligencia artificial (*Foundational IA models*); laboratorios con automatización robótica (*Labs robotics and automatization*); herramientas biológicas estrechas o de precisión (*Narrow Biological Tools-BT*), que son sistemas que se entrenan con datos biológicos y pueden ayudar a diseñar proteínas u otros agentes biológicos, y el ensamblaje o construcción de ADN (*DNA assembly*).¹²

12 DEL CASTELLO, Barbara; WILLIS, Henry. 2025, *op. cit.*

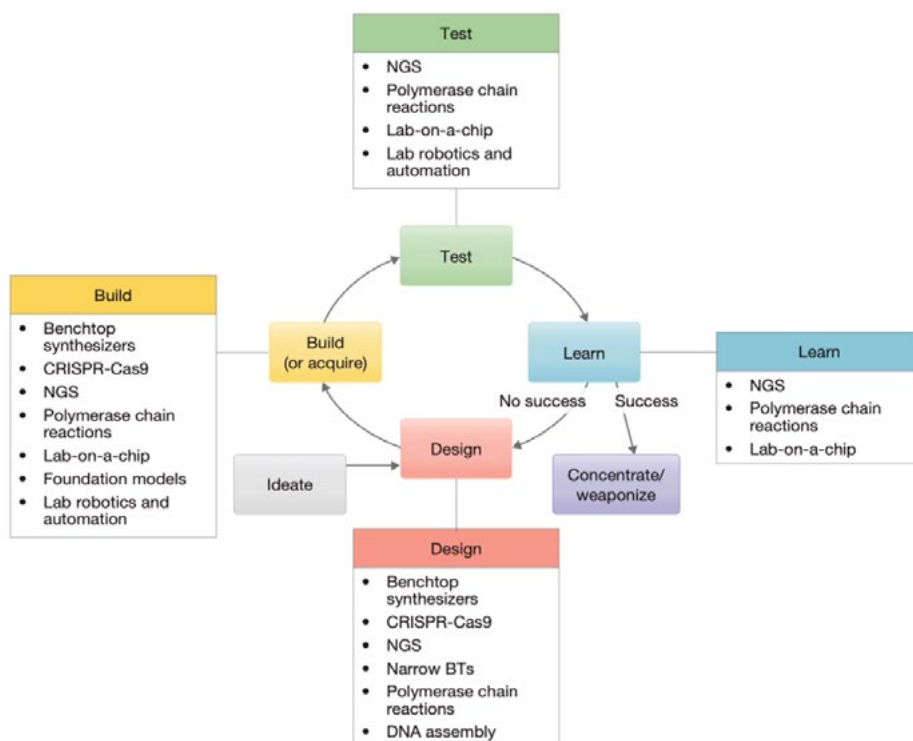


Figura N°2: Clasificación de tecnología emergente según etapas del proceso de fabricación de armas biológicas.

Fuente: DEL CASTELLO, Barbara; WILLIS, Henry, 2025, *op.cit.*

CRISPR, tecnología genética con potencial de uso dual

El método de “Repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas”, denominado CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*), es una técnica de edición de genes que permite cortar el ADN en un sitio específico para después editarlo. Si bien fue desarrollada para uso pacífico en alimentos y fármacos, tiene el potencial para desarrollar patógenos de diseño, con uso ofensivo, de ataque o guerra biológica, lo que implica un eventual uso dual.

Las bacterias cuentan con secuencias CRISPR, de ADN bacteriano que contiene fragmentos de ADN de virus que las han atacado. Estos fragmentos son utilizados por la bacteria para detectar y destruir el ADN de nuevos ataques de virus similares. De esta forma el sistema CRISPR/Cas es un sistema inmunitario procariontario (de bacterias), que confiere resistencia a agentes externos como plásmidos y fagos (virus) y provee una forma de inmunidad adquirida.¹³

13 CHILEBIO, CRISPR, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://chilebio.cl/edicion-de-genomas/crispr/>

Dentro de esta técnica, el “Sistema CRISPR-Cas”, cuenta con “proteínas asociadas” (*Cas: CRISPR-associated*), que corresponden a enzimas del tipo nucleasas, capaces de cortar el ADN de forma específica guiadas por secuencias de ARN, donde entre las que destacan los sistemas de la clase II, modificados por ingeniería genética para realizar cambios más eficaces en el genoma de células eucariotas, como por ejemplo, las células humanas.

CRISPR-Cas9 es uno de los sistemas que se encuentran dentro de los de clase II y cuenta con un complejo formado por la proteína Cas9 (nucleasa asociada a CRISPR) y un sgARN (*single-guided RNA*), que actúa como ARN guía dirigiendo a Cas9 al sitio diana, o secuencia objetivo, que es el lugar exacto del ADN que la proteína Cas9 debe cortar para realizar la edición genética.

La ciencia ha desarrollado CRISPR como una herramienta capaz de modificar el ADN, que ha sido aplicada desde bacterias hasta animales no-humanos (perros y monos), pasando por insectos, hongos, algas y alimentos vegetales, hasta su aplicación en humanos, tal como la edición genética en etapa embrionaria y posterior nacimiento de dos gemelas en China, el año 2018.¹⁴

En comparación con otra técnica genética, denominada “Reacción en cadena de la polimerasa (PCR)”, desarrollada en 1985 y que permitió aislar, copiar e insertar ADN de un organismo en otro en la primera forma de modificación genética ampliamente utilizada, el sistema CRISPR-Cas9 fue utilizado por primera vez para la edición genética en 2013 y es más barato, más rápido y más preciso que el PCR.¹⁵

Inteligencia artificial y diseño de proteínas virales y toxinas

La inteligencia artificial (IA) permite diseñar nuevas proteínas, utilizables como fármacos, vacunas y otras terapias, alimentos transgénicos, etc.

Sin embargo, la misma herramienta permite diseñar componentes básicos de armas biológicas o toxinas (ricina, toxina botulínica, toxina Shiga), lo que obliga a implementar una serie de medidas de protección, ya sea integradas en las propias herramientas de IA, para bloquear usos maliciosos y rastrear al creador de IA, o centradas en instalaciones de servicio u organizaciones que puedan convertir los diseños de proteínas generados por IA en producción a gran escala, como “punto de encuentro de la IA con el mundo real”, identificando el origen de las nuevas moléculas y su uso previsto, incluso realizar algunas pruebas para determinar si las nuevas moléculas son potencialmente peligrosas antes de producirlas.¹⁶

14 VENEGAS, Felipe. La tormenta ética de CRISPR. CIPER 24.03.2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciperchile.cl/2022/03/24/la-tormenta-etica-de-crispr/>

15 KNUTZEN, Michael. Synthetic Bioweapons Are Coming. Emerging and Disruptive Technology Essay Contest—First Prize, Proceedings, US Naval Institute, June 2021, Vol. 147/6/1/1.420. [En línea]. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2021/june/synthetic-bioweapons-are-coming>

16 TJANDRA, Kristel. Built-in safeguards might stop AI from designing bioweapons. ScienceInsider, Science, 28 Apr 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/built-safeguards-might-stop-ai-designing-bioweapons>

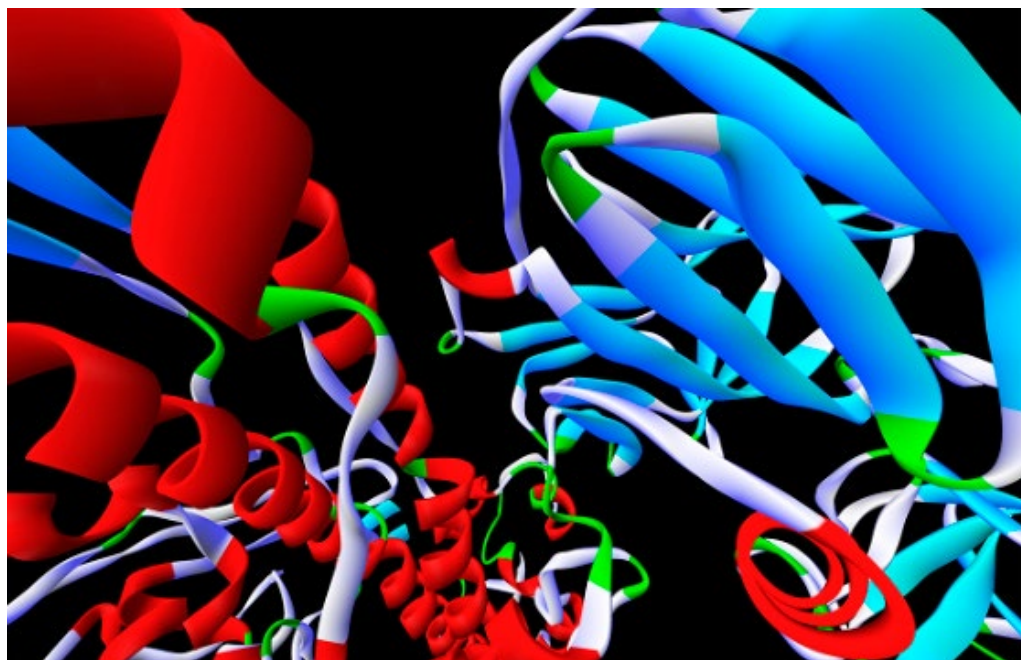


Figura N°3: Estructura de proteína sintética de toxina botulínica, generada por IA.

Fuente: CHARLES, Dan, "Made to order bioweapon? AI-designed toxins slip through safety checks used by companies selling genes". News, Science, 02 Oct 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/made-order-bioweapon-ai-designed-toxins-slip-through-safety-checks-used-companies>.

En un experimento sobre uso de IA, un equipo de Microsoft seleccionó 72 proteínas diferentes sujetas a controles legales, como la ricina, y mediante herramientas especializadas de diseño de proteínas con IA, obtuvo más de 70.000 secuencias de ADN que generarían variantes de esas proteínas, donde los modelos informáticos identificaron que algunas de las alternativas también serían tóxicas.¹⁷

El equipo de Microsoft no creó las proteínas ni analizó su toxicidad, porque eso habría requerido encargar los genes a proveedores de ADN e insertarlos en bacterias o levaduras para producir las proteínas de interés y hacerlo podría considerarse una violación de la Convención sobre Armas Biológicas, que prohíbe el desarrollo y la producción de tales armas; sin embargo, publicaron el estudio y sus resultados en la prestigiosa revista *Science*.¹⁸

17 CHARLES, Dan. ¿"Made to order bioweapon? AI-designed toxins slip through safety checks used by companies selling genes". News, Science, 02 Oct 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/made-order-bioweapon-ai-designed-toxins-slip-through-safety-checks-used-companies>

18 WITTMANN, Bruce *et al.* Strengthening nucleic acid biosecurity screening against generative protein design tools. Science, 2 Oct 2025, Vol 390, Issue 6768, pp. 82-87. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu8578>

La vulnerabilidad de la Convención de Armas Biológicas frente a las nuevas tecnologías

La Convención de Armas Biológicas y Toxinas (*BWC, Biological Weapon Convention*), del año 1972, ha quedado obsoleta frente a las nuevas armas biológicas y las tecnologías emergentes para su diseño y fabricación.

En una situación imaginaria, en un país con tensiones vecinales, internas o con grupos terroristas, pequeños laboratorios de investigación podrían modificar un virus de influenza común, con cambios sutiles, difíciles de distinguir de la investigación legítima de vacunas, pero con alta transmisibilidad y baja eficacia de los antivirales existentes, donde además el proyecto tenga un financiamiento poco transparente y los resultados nunca se publiquen; sería probable que tras la fachada exista un programa clandestino de armas biológicas.¹⁹

En teoría, las vías de desarrollo de armas biológicas podrían detectarse mediante las “Medidas de Fomento de la Confianza (MFC)”, de la Convención sobre Armas Biológicas y Toxinas (BWC), que los países presentan anualmente, con datos sobre la investigación biológica nacional. Sin embargo, existen deficiencias para detectar señales de alerta de un programa de armas biológicas de diseño.²⁰

Como ejemplo, un programa de armas biológicas que implique síntesis de toxinas para uso ofensivo, en el que la selección de una toxina podría realizarse mediante software de modelado, en lugar de los métodos tradicionales que implican la producción de toxinas físicas; es decir, el trabajo podría ejecutarse “in silico” (por modelación en computadora), y no se reflejaría en los informes anuales de datos, ya que estos se centran en el trabajo realizado en laboratorios de máxima contención.

La CAB prohíbe el desarrollo de agentes biológicos “de tipos y cantidades que no estén justificados para fines profilácticos, de protección u otros fines pacíficos”. Sin embargo, esa definición es poco operativa para vigilar el entorno biotecnológico actual, porque no especifica límites para distinguir entre una sustancia o un microbio “ilícito” y uno “legítimamente” modificado genéticamente o desarrollado sintéticamente.²¹

19 LENTZOS, Filippa; WINGO, Hailey; LITTLEWOOD, Jez; MUTI, Alberto. How new technology could make it easier to identify covert bioweapons programs. *Bulletin of the Atomic Scientists*, September 15, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://thebulletin.org/2025/09/how-new-technology-could-make-it-easier-to-identify-covert-bioweapons-programs/>

20 *Ibidem*.

21 GIORDANO, James, Bold. New Bioweapons: Part 1 - The Burdens of Detection and Attribution, Institute for National Strategic Studies (INSS), *Strategic Insights, News*, July 21, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inss.ndu.edu/Media/News/Article/4250380/bold-new-bioweapons-part-1-the-burdens-of-detection-and-attribution/>

Al permitir el diseño y ensamblaje de agentes biológicos modificados, nuevos o totalmente artificiales, que no presentan una firma reconocible en las bases de datos actuales de detección de patógenos (y contra los cuales no existe inmunidad natural ni antídoto), la discriminación de lo que constituye investigación exploratoria legítima y producción de armas biológicas se vuelve cada vez más difícil.

La detección y atribución de autoría de estos agentes biológicos se ve obstaculizada por la naturaleza modular de la biología sintética. Si un agente microbiano o tóxico está compuesto por secuencias genéticas derivadas de múltiples organismos naturales (o desarrolladas íntegramente a partir de genes sintéticos), su identificación y rastreo hasta un origen específico se vuelve extremadamente difícil, sin plataformas globales de intercambio de datos y conocimiento de “huellas dactilares” (características particulares de genotipo que permitan rastrearlas hasta los procesos de fabricación).

Una nueva forma de guerra biológica

Las armas biológicas de nueva generación, también denominadas armas biológicas sintéticas (*Synthetic Bioweapons* - SBW), son consideradas más peligrosas que las armas biológicas tradicionales, las que se encuentran prohibidas y la mayoría de los países han abandonado por considerarlas además poco fiables.²²

Un posible uso de las armas biológicas sintéticas podría consistir en neutralizar preventivamente una fuerza de tarea, antes de cualquier conflicto activo, incapacitando a la tropa en lugar de matarla. Un período de incubación específico o una alta tasa de transmisión presintomática puede ser planificado y programado, como también su “obsolescencia programada”, mediante la cual una enfermedad desaparece tras un número determinado de generaciones o no se transmite en condiciones ambientales no deseadas.

Otro ejemplo, pueden ser las llamadas “armas binarias”, que son infecciones pareadas, separadas para evadir la detección y que posteriormente pueden combinarse para obtener el efecto deseado. Si dos virus complementarios e inofensivos se liberan en dos lugares distintos, pero luego las personas se exponen a ambos, al juntarse los virus generan una enfermedad debilitante, en la forma de ataques encubiertos.

También existe la posibilidad de “ataques genéticos étnicos específicos” contra personas, grupos raciales o étnicos enteros, donde SBW con altos niveles de transmisión asintomática podrían transmitirse de un huésped a otro a través del entorno humano, hasta llegar a un objetivo vulnerable

²² KNUTZEN, Michael. 2021, *op. cit.*

o a objetivos con los genes “adecuados”, especialmente si se obtienen los registros médicos o la información genética de las personas.

Respecto de posibles escenarios de amenazas biológicas, el año 2018 en Estados Unidos, antes de la pandemia de COVID-19, la Academia Nacional de Ciencias, a partir de un estudio encargado por el Departamento de Defensa, describió tres escenarios particularmente peligrosos de biología sintética, tales como la técnica de reproducir virus con código genético de internet, crear bacterias resistentes a los antibióticos y la posibilidad de “programar” microbios para que envenenen lentamente a las personas a través de su metabolismo, lo que incluso podría causar la muerte después de un tiempo, o propaguen entre la población alteraciones del ADN de las personas, como una versión de “genética dirigida”.²³

En un nuevo escenario, la carencia o debilidad en las capacidades de defensa biológica se convierte en una grave vulnerabilidad para una fuerza militar expuesta a agentes biológicos, en operaciones de guerra y distintas a la guerra, y en una oportunidad y ventaja estratégica para el que las posea, utilice y cuente con medios de protección e identificación de última generación.²⁴

Defensa frente a las nuevas armas biológicas

Los actuales avances tecnológicos son parte de la “Cuarta Revolución Industrial”, que se caracteriza por una fusión de tecnologías, como la inteligencia artificial, la edición genética y la robótica avanzada, que está difuminando las fronteras entre los mundos físico, digital y biológico.²⁵

Frente a este nuevo paradigma, en el Reino Unido (*United Kingdom – UK*), el año 2023 se construyó una “Estrategia de Seguridad Biológica”, que se centra en las oportunidades y riesgos que presentan los avances en la biotecnología, implementando controles adecuados para frenar el uso indebido (doble uso), pero sin detener la innovación, en un equilibrio gestionado entre los sectores defensa, salud y agricultura (producción de alimentos).²⁶

Un estudio publicado en la revista *Science*, señala que una forma para limitar la investigación biológica potencialmente dañina, es restringiendo la síntesis comercial de ADN que

23 JULING, Dominik, 2023, *op. cit.*

24 BETZHOLD, Alexander, “Innovación tecnológica en defensa biológica, análisis de doctrina y técnicas actuales”, Memorial del Ejército N° 516, julio 2025, Centro de Estudios e Investigaciones Militares (CESIM), Santiago, Chile, pp. 31-47. [En línea]. Disponible en: <https://ejercito.cl/descargas/desktop/NDg2Mg==>

25 UK GOVERNMENT, *Eroding norms and emerging threats: the evolving challenge of chemical and biological weapons*, Research and análisis, Published 1 October 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/new-challenges-to-counter-chemical-and-biological-warfare/eroding-norms-and-emerging-threats-the-evolving-challenge-of-chemical-and-biological-weapons>

26 UK BIOLOGICAL SECURITY STRATEGY, 12/06/2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-biological-security-strategy/uk-biological-security-strategy.html>

codifica proteínas específicas o proviene de determinados patógenos seleccionados, junto con la implementación de software especializado para identificar secuencias de proteínas que han sido alteradas mediante métodos de diseño.²⁷

También se pueden actualizar los alcances de las “Medidas de Fomento de la Confianza (MFC)” de la CAB, que podrían capturar más datos de investigación y comercio de ciertos artículos de diseño genómico y de las instalaciones fitosanitarias y laboratorios capaces de sintetizar virus, ácidos nucleicos y péptidos.²⁸

Los sistemas de gestión de emergencias pueden potenciarse con el uso de IA, para mejorar las capacidades de respuesta a brotes causados por ataques bioterroristas, optimizando las estrategias de contención y la distribución de recursos en crisis de salud pública.

La IA puede permitir el rastreo y la atribución de ataques biológicos, permitiendo que las técnicas de ingeniería genética forense determinen el origen de un patógeno. El análisis de ADN puede vincular un agente biológico con su laboratorio de origen, mientras que los sistemas analíticos basados en IA pueden reconstruir la cadena de eventos que condujo a la liberación del patógeno, distinguiendo entre ataques deliberados y brotes naturales.²⁹

También puede utilizarse la IA para supervisar el uso de biotecnologías avanzadas y prevenir su uso indebido. Algoritmos especializados pueden filtrar las solicitudes a herramientas de biología sintética, bloqueando operaciones que puedan suponer un riesgo para la seguridad. Los modelos de lenguaje regulados podrían impedir la difusión de instrucciones para la creación de armas biológicas, mientras que los sistemas de autenticación y control de acceso basados en IA podrían supervisar el uso de bases de datos genéticas y laboratorios de biología sintética para detectar y prevenir actividades sospechosas.

Incluso el desarrollo con IA de contramedidas ante amenazas bioterroristas, puede permitir diseñar vacunas y terapias dirigidas. Al analizar las estructuras proteicas de nuevos patógenos, la IA puede identificar las moléculas más eficaces para su neutralización, reduciendo los tiempos de respuesta. Los algoritmos de IA también pueden simular escenarios de propagación de epidemias y sugerir estrategias óptimas de contención, apoyando la gestión sanitaria de emergencias biológicas. Este enfoque ya se ha aplicado con éxito en el desarrollo de vacunas de ARNm, como las de la COVID-19, lo que demuestra cómo la IA puede acortar significativamente el tiempo necesario para responder a las amenazas biológicas.

27 WITTMANN, Bruce *et al.* 2025, *op. cit.*

28 LENTZOS, Filippa; WINGO, Hailey; LITTLEWOOD, Jez; MUTI, Alberto. 2025, *op. cit.*

29 GIORDANO, James. 2025, *op. cit.*

Capacidades en Chile

El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), dependiente del Ministerio de Agricultura, es la entidad encargada de regular la biotecnología agrícola en Chile, en base a la definición de organismo modificado genéticamente (OMG) para abordar las “nuevas técnicas de mejoramiento genético” (New Breeding Techniques - NBTs), considerando como OMG a cualquier organismo vivo con una combinación novedosa de material genético obtenida mediante biotecnología moderna. Sin embargo, Chile ha acotado este concepto, definiendo una combinación novedosa como la inserción estable de uno o más genes o secuencias de ADN que codifican proteínas, ARN de interferencia, ARN de doble hebra, péptidos señal o secuencias regulatorias introducidas permanentemente en el genoma de la planta. De esta manera, los productos desarrollados mediante NBTs que no contienen ADN exógeno en el producto final no se consideran OMGs (transgénicos) y se tratan como convencionales.³⁰

Las nuevas técnicas de mejoramiento genético (NBT), como la edición genómica, están transformando la agricultura al permitir modificaciones precisas en los genomas de las plantas que pueden acelerar el crecimiento, mejorar la resiliencia de los cultivos y su calidad nutricional. Tecnologías como CRISPR-Cas9, las nucleasas efectoras tipo activador de la transcripción (*Transcription Activator-Like Effector Nucleases* – TALEN) y otras herramientas de edición genética se incluyen en el alcance de las NBT y ofrecen alternativas de mejoramiento genético convencional y la modificación genética tradicional, que a menudo implican enfoques transgénicos.³¹

CONCLUSIONES

Las tecnologías emergentes de edición genética de plantas, animales, microorganismos (virus, bacterias, hongos, etc.), toxinas (proteínas con efecto tóxico), e incluso en humanos, se han diversificado y perfeccionado, logrando menor costo, mayor eficiencia, y un ensamblaje con la inteligencia artificial, para el diseño de secuencias genéticas, previo a la fabricación de moléculas.

Este nuevo escenario, en el marco de la “Cuarta Revolución Industrial”, obliga a actualizar los mecanismos de alerta y control de la Convención de Armas Biológicas, que han sido superados por las nuevas tecnologías de diseño de patógenos y toxinas.

Del mismo modo, a nivel nacional, es necesario que el sector defensa genere estrategias de vigilancia estratégica de las capacidades de uso dual de instalaciones y laboratorios de las áreas

30 FUNDACION ANTAMA. Chile se posiciona como referente global en biotecnología y edición genética en agricultura. 06/02/2025. [En línea]. Disponible en: <https://fundacion-antama.org/chile-se-posiciona-como-referente-global-en-biotecnologia-y-edicion-genetica-en-agricultura/>

31 SÁNCHEZ, Miguel. The Global Advance of Genome-Edited Plants to the Market: The Key Role of Chile in Its Development. Plants. 2024

alimentarias, agricultura, salud, farmacéutica, investigación científica y de inteligencia artificial. Esto se traduce a nivel Estado, en un esfuerzo interministerial (Ministerio de Defensa, de Salud, de Ciencias, de Agricultura) para prepararse (capacidad de anticipación) antes de la aparición de estas amenazas, desarrollando planes de prevención y respuestas, con recursos asociados y capacidades instaladas en organismos clave, como el Ejército, Senapred y Sistema de Salud pública.

Finalmente, en el ámbito de la doctrina y capacidades del Ejército, el conocimiento de estas nuevas amenazas es fundamental para identificarlas y preparar mecanismos de respuesta en el ámbito de la defensa biológica, de tal forma que no se convierta en una vulnerabilidad para las operaciones militares y se logre proteger la salud de la Fuerza Terrestre en forma adecuada, pudiendo interpretarse también como una oportunidad para revisar y actualizar la doctrina, a través de reglamentos, manuales, cartillas, etc., junto con la implementación de contenidos y entrenamiento, asociado al conocimiento del personal del Ejército, especialmente de la Fuerza Terrestre y especialistas.

BIBLIOGRAFÍA

BETZHOLD, Alexander. “Innovación tecnológica en defensa biológica, análisis de doctrina y técnicas actuales”, Memorial del Ejército N° 516, julio 2025, Centro de Estudios e Investigaciones Militares (CESIM), Santiago, Chile, pp. 31-47. [En línea]. Disponible en: <https://ejercito.cl/descargas/desktop/NDg2Mg==>

CHARLES, Dan. ¿“Made to order bioweapon? AI-designed toxins slip through safety checks used by companies selling genes”. News, Science, 02 Oct 2025, doi: 10.1126/science.zqvceub. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/made-order-bioweapon-ai-designed-toxins-slip-through-safety-checks-used-companies>

CHILEBIO, CRISPR. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://chilebio.cl/edicion-de-genomas/crispr/>

DEL CASTELLO, Barbara; WILLIS, Henry. Assessing the Impacts of Technology Maturity and Diffusion on Malicious Biological Agent Development Capabilities: Demonstrating a Transparent, Repeatable Assessment Method, RAND Corporation, August 11, 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA3662-1.html?source=globalbiodefense.com

DELLAMURA, Maria. “From Biowarfare to Bioterrorism: the future of biological threats in the AI era”. TechFuture, Emerging Technologies, 25/02/2025. [En línea]. Disponible en: <https://tech4future.info/en/bioterrorism-biological-threats-in-the-ai-era/>

FUNDACION ANTAMA. Chile se posiciona como referente global en biotecnología y edición genética en agricultura. 06/02/2025. [En línea]. Disponible en: <https://fundacion-antama.org/chile-se-posiciona-como-referente-global-en-biotecnologia-y-edicion-genetica-en-agricultura/>

- GIORDANO, James, Bold, “New Bioweapons: Part 1 - The Burdens of Detection and Attribution”, Institute for National Strategic Studies (INSS), Strategic Insights, News, July 21, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inss.ndu.edu/Media/News/Article/4250380/bold-new-bioweapons-part-1-the-burdens-of-detection-and-attribution/>
- JULING, Dominik. “Future Bioterror and Biowarfare Threats for NATO’s Armed Forces until 2030”. *Journal of Advanced Military Studies*, vol. 14, N° 1, Spring 2023, s. pp. 118-133. [En línea]. Disponible en: https://www.usmcu.edu/Portals/218/JAMS_Spring%202023_14_1_web3.pdf
- KHALIL, Abdelwahab; ABDELGAWAD, Shaimaa; EL-HAREEF, Aya; *et al.* “Insects as disease vectors: Historical and contemporary analysis of entomological warfare”. *Ambio, Journal of Environment and Society*, 07 June 2025, Sweden. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-025-02212-x#citeas>
- KNUTZEN, Michael. “Synthetic Bioweapons Are Coming. Emerging and Disruptive Technology Essay Contest–First Prize”, *Proceedings, US Naval Institute*, June 2021, Vol. 147/6/1/1.420. [En línea]. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2021/june/synthetic-bioweapons-are-coming>
- LENTZOS, Filippa; WINGO, Hailey; LITTLEWOOD, Jez; MUTI, Alberto. “How new technology could make it easier to identify covert bioweapons programs”. *Bulletin of the Atomic Scientists*, September 15, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://thebulletin.org/2025/09/how-new-technology-could-make-it-easier-to-identify-covert-bioweapons-programs/>
- SÁNCHEZ, Miguel. “The Global Advance of Genome-Edited Plants to the Market: The Key Role of Chile in Its Development”. *Plants*. 2024; 13(24):3597. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/24/3597>
- TJANDRA, Kristel. “Built-in safeguards might stop AI from designing bioweapons. ScienceInsider”, *Science*, 28 Apr 2025, doi: 10.1126/science.zvzgaw3. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/content/article/built-safeguards-might-stop-ai-designing-bioweapons>
- UK Biological Security Strategy, 12/06/2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-biological-security-strategy/uk-biological-security-strategy-html>
- UK GOVERNMENT. *Eroding norms and emerging threats: the evolving challenge of chemical and biological weapons*, Research and análisis, Published 1 October 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/publications/new-challenges-to-counter-chemical-and-biological-warfare/eroding-norms-and-emerging-threats-the-evolving-challenge-of-chemical-and-biological-weapons>

VAN AKEN, Jan; HAMMOND, Edward. "Genetic engineering and biological weapons. New technologies, desires and threats from biological research". EMBO Rep. 2003 Jun;4 Spec No (Suppl 1): S57-60. PMID: 12789409; PMCID: PMC1326447. [En línea]. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1326447/pdf/4-embor860.pdf>

VENEGAS, Felipe. La tormenta ética de CRISPR. CIPER 24.03.2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciperchile.cl/2022/03/24/la-tormenta-etica-de-crispr/>

WITTMANN, Bruce; *et al.*, "Strengthening nucleic acid biosecurity screening against generative protein design tools". Science, 2 Oct 2025, Vol 390, Issue 6768, pp. 82-87. [En línea]. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu8578>