



## Revolución del ARNm: impacto sanitario y social de una nueva era en la historia de la inmunología

Aixa Marlene Martínez Abelarde,\* Rey Michel Guerra Saladriga, Leisis María Torres Pestana

Facultad de Medicina, Universidad de Ciencias Médicas de Camagüey. Camagüey, Cuba.  
\*Dirección electrónica: aixam398@gmail.com

### Resumen

La tecnología de ARN mensajero (ARNm) constituye uno de los avances más trascendentales en la historia de la inmunología y la vacunología del siglo XXI. Aunque sus fundamentos moleculares fueron establecidos en la segunda mitad del siglo XX, fue la pandemia de COVID-19 la que impulsó su aplicación clínica masiva a escala global, demostrando su eficacia y seguridad sin precedentes. Este trabajo analiza el recorrido histórico de la tecnología ARNm desde sus bases conceptuales hasta su implementación en la campaña de vacunación más extensa de la historia; examina los impactos sanitarios documentados entre 2020 y 2024, incluyendo la reducción de morbilidad por COVID-19 y las perspectivas en oncología e infecciosas; y reflexiona sobre los profundos cambios sociales que este proceso ha generado: transformaciones en la percepción pública de la ciencia, el fenómeno de la infodemia y las inequidades globales en el acceso a las vacunas. La evidencia acumulada demuestra que las vacunas de ARNm han salvado millones de vidas y han abierto una nueva era terapéutica que trasciende la vacunología convencional, con aplicaciones emergentes en el tratamiento del cáncer y otras enfermedades crónicas. Situar este capítulo en la historia de la inmunología resulta indispensable para comprender la ciencia y la salud pública del presente.

### Introducción

La historia de la inmunología es, en esencia, la historia de la lucha del ser humano por comprender y potenciar las defensas naturales del organismo frente a las enfermedades. Desde las primeras observaciones de Edward Jenner sobre la variolización a finales del siglo XVIII, pasando por los revolucionarios trabajos de Louis Pasteur y Robert Koch sobre la inmunidad adquirida en el siglo XIX, hasta los descubrimientos de Elie Metchnikoff sobre la fagocitosis y de Paul Ehrlich sobre los anticuerpos —que les valieron el Premio Nobel en 1908—, cada etapa de la inmunología ha estado marcada por hallazgos que transformaron tanto el conocimiento científico como la práctica clínica y la salud pública.<sup>1</sup>

El siglo XX fue escenario de una aceleración sin precedentes en el desarrollo de la inmunología como disciplina autónoma. La descripción de los linfocitos T y B como células centrales de la inmunidad adaptativa, el descubrimiento del complejo mayor de histocompatibilidad (CMH), el desarrollo de los anticuerpos monoclonales por Köhler y Milstein en 1975, y los avances en la comprensión de las citocinas y los mecanismos de tolerancia inmunológica configuraron una disciplina de enorme complejidad y riqueza conceptual.<sup>2</sup> Cada uno de estos hitos generó aplicaciones clínicas de gran relevancia: vacunas más eficaces, tratamientos inmunosupresores para el trasplante de órganos,



1 al 30 de abril de 2026 Universidad de Ciencias Médicas de Las Tunas, Cuba

<https://eventosinmunologia.sld.cu/index.php/inmunoistoria2026/2026>



terapias biológicas para enfermedades autoinmunes y, más recientemente, inmunoterapias oncológicas que han cambiado el pronóstico de enfermedades antes consideradas incurables.

Es en este contexto histórico donde debe situarse el surgimiento de la tecnología de ARN mensajero (ARNm) como plataforma terapéutica. La idea de aprovechar esta molécula como vehículo para instruir a las células humanas en la producción de antígenos específicos, desencadenando así una respuesta inmune protectora, fue planteada teóricamente en la década de 1980, pero tardó más de tres décadas en convertirse en una realidad clínica.<sup>3</sup> Las razones de esta demora no fueron conceptuales, sino técnicas: la inestabilidad inherente del ARNm fuera del entorno celular, su degradación enzimática rápida en los fluidos biológicos y su capacidad para desencadenar respuestas inflamatorias inespecíficas del sistema inmune innato representaron barreras que parecieron, durante mucho tiempo, insuperables.

Fue necesaria la convergencia de múltiples líneas de investigación —la química de los ácidos nucleicos, la nanotecnología de sistemas de entrega, la inmunología molecular y la bioinformática— para superar esas barreras. El trabajo fundamental de Katalin Karikó y Drew Weissman, publicado en 2005 en la revista *Immunity*, demostró que la incorporación de pseudouridina en lugar de uridina en la cadena de ARNm reducía drásticamente su reconocimiento por los receptores de inmunidad innata, sin comprometer la capacidad de la molécula para ser traducida eficientemente por los ribosomas celulares.<sup>4</sup> Este descubrimiento fue la llave que abrió la puerta a la aplicación clínica del ARNm; sus autores fueron galardonados con el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 2023.

La pandemia de COVID-19, declarada por la Organización Mundial de la Salud el 11 de marzo de 2020, representó el escenario en que esta tecnología demostró su potencial transformador. La urgencia sanitaria global aceleró los procesos regulatorios, movilizó financiamiento público y privado sin precedentes, y puso a prueba la solidez científica de la plataforma ARNm ante el escrutinio de la comunidad científica internacional. El resultado —vacunas con eficacias superiores al 90%, desarrolladas en menos de un año— marcó un antes y un después en la historia de la vacunología.<sup>5</sup>

El presente trabajo tiene como objetivo analizar, desde una perspectiva histórica e inmunológica, el trayecto de la tecnología ARNm desde sus fundamentos científicos hasta su implementación a escala global; examinar los impactos sanitarios y sociales documentados en el período 2020-2025; y reflexionar sobre las lecciones que este proceso aporta para la historia de la inmunología y para el futuro de la salud pública mundial.

## Desarrollo

### Fundamentos históricos y moleculares de la tecnología ARNm

El ARN mensajero fue descrito por primera vez en 1961 de manera simultánea por Sydney Brenner, François Jacob y Matthew Meselson, quienes demostraron experimentalmente que el ARNm era la molécula intermediaria entre la información genética contenida en el ADN y la síntesis proteica realizada por los ribosomas, confirmando el dogma central de la biología



1 al 30 de abril de 2026 Universidad de Ciencias Médicas de Las Tunas, Cuba

<https://eventosinmunologia.sld.cu/index.php/inmunohistoria2026/2026>



molecular propuesto por Francis Crick.<sup>6</sup> Sin embargo, la posibilidad de utilizar ARNm sintético como herramienta terapéutica no fue considerada seriamente hasta décadas más tarde.

El primer hito experimental relevante ocurrió en 1990, cuando Robert Malone, Jon Wolff y colaboradores demostraron que era posible introducir ARNm encapsulado en liposomas directamente en células de ratón *in vivo*, logrando la expresión de la proteína codificada.<sup>7</sup> Este experimento publicado en *Science* es considerado el punto de partida de la investigación en ARNm terapéutico, aunque en ese momento sus implicaciones clínicas no fueron inmediatamente valoradas por la comunidad científica debido a la inestabilidad molecular del ARNm exógeno y su elevada inmunogenicidad.

Durante las décadas de 1990 y 2000, la investigación en ARNm terapéutico avanzó de manera lenta. La vida media del ARNm fuera del entorno celular es extremadamente corta, debido a la acción de ribonucleasas (RNasas) ubicuas en tejidos y fluidos biológicos. Además, el ARNm exógeno era reconocido como señal de peligro por el sistema inmune innato a través de receptores de reconocimiento de patrones como TLR3, TLR7, TLR8 y MDA5, desencadenando respuestas inflamatorias que interferían con la expresión proteica y generaban toxicidad potencial.<sup>8</sup>

El descubrimiento de Karikó y Weissman publicado en *Immunity* en 2005 fue un cambio de paradigma: al demostrar que la sustitución de uridina por pseudouridina eliminaba prácticamente el reconocimiento del ARNm sintético por los receptores TLR sin afectar su traducción, resolvieron uno de los principales obstáculos técnicos de la plataforma.<sup>4</sup> Trabajos posteriores del mismo grupo identificaron que la N1-metilpseudouridina (m1Ψ), incorporada en las vacunas comerciales, optimizó aún más la estabilidad y la expresión proteica del ARNm sintético.<sup>9</sup>

Paralelamente, el desarrollo de los sistemas de nanopartículas lipídicas (LNP) como vehículos de entrega del ARNm representó otro avance decisivo. Las LNP son vesículas de 80-100 nanómetros compuestas por lípidos ionizables, lípidos auxiliares, colesterol y polietilenglicol (PEG), que encapsulan y protegen al ARNm de la degradación enzimática y facilitan su liberación en el citoplasma celular.<sup>10</sup> La incorporación de lípidos ionizables de cuarta generación —como el ALC-0315 en la vacuna de Pfizer-BioNTech y el SM-102 en la de Moderna— optimizó la eficiencia de entrega intracelular y el perfil de tolerabilidad, siendo determinantes para el éxito clínico de ambas vacunas.

Un componente crítico adicional fue la ingeniería de la proteína Spike del SARS-CoV-2. Investigadores del NIH liderados por Barney Graham y Jason McLellan desarrollaron la tecnología '2P': la introducción de dos mutaciones de prolina que estabilizaban la proteína *Spike* en su conformación de prefusión, más inmunogénica que la conformación de posfusión.<sup>11</sup> Esta ingeniería molecular, integrada en el ARNm de ambas vacunas aprobadas, fue determinante para su alta eficacia en ensayos clínicos.

## Las vacunas ARNm frente a la COVID-19: diseño, aprobación y mecanismo inmunológico



1 al 30 de abril de 2026 Universidad de Ciencias Médicas de Las Tunas, Cuba

<https://eventosinmunologia.sld.cu/index.php/inmunohistoria2026/2026>



El 10 de enero de 2020, investigadores chinos depositaron en bases de datos públicas la secuencia genómica completa del SARS-CoV-2. En menos de 48 horas, los equipos de BioNTech y Moderna habían iniciado el diseño de sus respectivas vacunas basadas en ARNm, utilizando la secuencia de la proteína Spike como antígeno diana.<sup>12</sup> Esta velocidad de respuesta solo fue posible gracias a la flexibilidad intrínseca de la plataforma ARNm: una vez definida la secuencia proteica de interés, el diseño y la síntesis del ARNm correspondiente pueden realizarse en cuestión de días.

El ensayo de fase III de la vacuna BNT162b2 (Pfizer-BioNTech), con más de 43.000 participantes, demostró una eficacia del 95% en la prevención de COVID-19 sintomático en personas sin infección previa.<sup>13</sup> La vacuna mRNA-1273 (Moderna) alcanzó una eficacia del 94,1% en su ensayo de fase III, con resultados especialmente sólidos en subgrupos de alto riesgo como mayores de 65 años y personas con comorbilidades.<sup>14</sup> La autorización de uso de emergencia de BNT162b2 por la FDA el 11 de diciembre de 2020 marcó un hito histórico: fue la primera autorización regulatoria de una vacuna basada en tecnología ARNm en seres humanos.

Desde el punto de vista inmunológico, las vacunas ARNm generan respuestas adaptativas de notable amplitud. Una vez administradas por vía intramuscular, las LNP son captadas principalmente por células dendríticas y macrófagos. En el citoplasma, el ARNm es traducido en proteína Spike, que es procesada y presentada en el contexto del CMH de clases I y II, activando tanto linfocitos T citotóxicos CD8+ como linfocitos T cooperadores CD4+, que estimulan a su vez a los linfocitos B para la producción de anticuerpos específicos y el establecimiento de memoria inmunológica de larga duración.<sup>15</sup>

La generación de linfocitos T de memoria ha sido uno de los hallazgos más relevantes del seguimiento a largo plazo de los vacunados. Estudios publicados en *Science Immunology* demostraron que los linfocitos T CD4+ y CD8+ específicos frente a Spike persistían durante al menos 6-8 meses post-vacunación con características fenotípicas de células de memoria de larga vida.<sup>15</sup> Estos datos sugieren que la inmunidad celular puede mantener protección frente a formas graves de COVID-19 incluso cuando los títulos de anticuerpos neutralizantes disminuyen con el tiempo, lo que tiene importantes implicaciones para las estrategias de refuerzo vacunal.

### **Impactos sanitarios: morbilidad, efectividad real y perspectivas terapéuticas**

El impacto cuantificado de las vacunas ARNm sobre la morbilidad global por COVID-19 es de magnitud histórica. Un estudio de modelamiento matemático del *Imperial College London* estimó que durante el primer año de la campaña global de vacunación —diciembre 2020 a diciembre 2021— se evitaron aproximadamente 19,8 millones de muertes en 185 países y territorios.<sup>16</sup> Este dato sitúa a las vacunas ARNm entre las intervenciones de salud pública más eficaces de la historia de la medicina moderna.

A nivel de los sistemas de salud, las vacunas ARNm contribuyeron decisivamente a reducir la presión asistencial sobre hospitales y unidades de cuidados intensivos en países con altas coberturas de vacunación. Datos de efectividad real en Israel —uno de los primeros países en completar la vacunación masiva— demostraron reducciones del 87% en hospitalizaciones





y del 92% en muertes por COVID-19 en personas vacunadas con dos dosis de BNT162b2 frente a no vacunadas.<sup>17</sup> Estos datos de efectividad real consolidaron la evidencia de los ensayos clínicos en condiciones de implementación masiva.

Más allá de la COVID-19, la plataforma ARNm ha demostrado potencial terapéutico de largo alcance. En el campo de las enfermedades infecciosas, se encuentran en desarrollo vacunas ARNm multivalentes contra la influenza estacional y pandémica, con ensayos clínicos de fase I que han mostrado resultados prometedores en inmunogenicidad y seguridad.<sup>18</sup> Esto representa una oportunidad histórica para reformular la vacunación antigripal, que aún depende de tecnologías de producción en huevo con limitaciones de adaptabilidad y escalabilidad.

En oncología, los resultados más disruptivos provienen de las vacunas personalizadas contra el cáncer. Un ensayo publicado en *Nature* en 2023 evaluó una vacuna ARNm que codificaba neoantígenos específicos del tumor de cada paciente con cáncer de páncreas, en combinación con pembrolizumab, demostrando la generación de respuestas de linfocitos T específicos contra neoantígenos tumorales y señales de eficacia clínica en pacientes con enfermedad reseca.<sup>19</sup> Estos resultados abren una perspectiva revolucionaria en la inmunoterapia oncológica personalizada.

Otras aplicaciones terapéuticas en desarrollo incluyen el uso de ARNm para la producción in vivo de proteínas de reemplazo en enfermedades metabólicas y genéticas raras, la edición genómica mediante ARNm codificante de nucleasas CRISPR-Cas9 y la regeneración tisular.<sup>20</sup> La versatilidad, velocidad de diseño y escalabilidad de la plataforma ARNm la posicionan como una de las herramientas biomédicas más transformadoras del siglo XXI.

### **Impactos sociales: confianza en la ciencia, infodemia y equidad en el acceso**

El despliegue de las vacunas ARNm generó impactos sociales de enorme complejidad. Encuestas realizadas en 23 países durante 2021 y 2022 documentaron niveles variables de aceptación vacunal: mientras en algunos países asiáticos la aceptación superaba el 90%, en varios países europeos y americanos oscilaba entre el 60% y el 75%, con diferencias significativas según nivel educativo, confianza en las instituciones sanitarias y exposición a información sobre las vacunas.<sup>21</sup> Esta variabilidad reflejó la complejidad de la interfaz entre ciencia y sociedad en contextos de incertidumbre y urgencia.

La Organización Mundial de la Salud acuñó en 2020 el término 'infodemia' para describir la sobreabundancia de información —veraz y falsa— que dificultó la toma de decisiones tanto de la ciudadanía como de los sistemas de salud.<sup>22</sup> La infodemia sobre las vacunas ARNm adoptó múltiples formas: afirmaciones falsas sobre la modificación permanente del ADN humano, teorías conspirativas sobre microchips en las vacunas, exageración de efectos adversos reales e informaciones engañosas sobre eficacia. Estas narrativas se propagaron a través de redes sociales a una velocidad que superó la capacidad de respuesta de los sistemas de comunicación en salud pública.

Los efectos de la desinformación sobre las coberturas de vacunación fueron documentados empíricamente. Un análisis publicado en *Nature Human Behaviour* estimó que la exposición





a mensajes desinformativos redujo significativamente la intención de vacunación en el Reino Unido y Estados Unidos, con una disminución media de la disposición a vacunarse de hasta 6,2 puntos porcentuales tras la exposición a una sola pieza de contenido falso.<sup>23</sup> Estos datos confieren a la lucha contra la desinformación sanitaria una dimensión de salud pública urgente.

Un segundo eje de impacto social fue la profunda inequidad global en el acceso a las vacunas ARNm. Mientras países de altos ingresos completaban la vacunación de sus poblaciones adultas en la primera mitad de 2021, la mayoría de los países de bajos ingresos apenas habían comenzado a vacunar a sus trabajadores de salud. Wouters y colaboradores documentaron en *The Lancet* las múltiples dimensiones de esta brecha: limitaciones de producción, concentración de contratos de compra anticipada en países ricos, restricciones a la transferencia de tecnología y déficit en infraestructura de cadena de frío.<sup>24</sup>

Este fenómeno, denominado 'nacionalismo vacunal', generó un debate ético y político de amplio alcance sobre los modelos de gobernanza de la innovación biomédica en contextos de emergencia sanitaria. La propuesta de suspensión temporal de patentes de vacunas ARNm, impulsada por India y Sudáfrica en la OMC, puso en tensión los principios de propiedad intelectual con los de equidad sanitaria global, un debate que permanece abierto y que ha enriquecido la reflexión internacional sobre justicia en salud.<sup>24</sup>

## Conclusiones

La tecnología de ARNm representa, sin lugar a dudas, uno de los hitos más significativos en la historia de la inmunología y la vacunología del siglo XXI. Su trayectoria —desde los experimentos de transfección de 1990, pasando por el descubrimiento de las modificaciones de nucleósidos en 2005, hasta las vacunas aprobadas en 2020— ilustra con claridad cómo la investigación básica sostenida durante décadas puede derivar en innovaciones terapéuticas de alcance global cuando confluyen las condiciones científicas, tecnológicas y sociales adecuadas.

Los impactos sanitarios documentados son históricos: millones de muertes evitadas, reducción sustancial de la presión hospitalaria en países con altas coberturas de vacunación, y la apertura de una nueva frontera terapéutica en oncología e infecciosas que promete transformar el tratamiento de enfermedades de difícil abordaje. La plataforma ARNm ha demostrado ser adaptable, escalable y capaz de generar respuestas inmunes potentes y duraderas, lo que la posiciona como una de las herramientas biomédicas más versátiles disponibles para la medicina del siglo XXI.

Al mismo tiempo, el despliegue de las vacunas ARNm ha revelado vulnerabilidades estructurales de los sistemas globales de salud pública: la brecha de equidad en el acceso, la proliferación de desinformación y el debilitamiento de la confianza institucional requieren respuestas sistémicas que incluyen comunicación científica transparente, gobernanza global de la innovación biomédica e inversión sostenida en educación sanitaria.

Finalmente, el análisis de este período desde la perspectiva de la historia de la inmunología pone de relieve que los grandes avances científicos no ocurren de manera aislada, sino en el





contexto de redes de investigadores, instituciones, financiadores y políticas públicas que los hacen posibles. Preservar y transmitir esta memoria histórica es una responsabilidad ineludible de la comunidad científica, para que las lecciones aprendidas orienten la respuesta a los desafíos sanitarios del futuro.

## Referencias bibliográficas

1. Silverstein AM. A history of immunology. 2nd ed. San Diego: Academic Press; 2009. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/a-history-of-immunology/silverstein/978-0-12-370586-8>
2. Janeway CA Jr, Travers P, Walport M, Shlomchik MJ. Immunobiology: the immune system in health and disease. 6th ed. New York: Garland Science; 2005. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10757/>
3. Sahin U, Karikó K, Türeci Ö. mRNA-based therapeutics: developing a new class of drugs. Nat Rev Drug Discov. 2014;13(10):759-80. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nrd4278>
4. Karikó K, Buckstein M, Ni H, Weissman D. Suppression of RNA recognition by Toll-like receptors: the impact of nucleoside modification and the evolutionary origin of RNA. Immunity. 2005;23(2):165-75. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2005.06.008>
5. Polack FP, Thomas SJ, Kitchin N, Absalon J, Gurtman A, Lockhart S, et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine. N Engl J Med. 2020;383(27):2603-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2034577>
6. Brenner S, Jacob F, Meselson M. An unstable intermediate carrying information from genes to ribosomes for protein synthesis. Nature [Internet]. 1961 [citado 2026 feb 26];190(4776):576-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/190576a0>
7. Wolff JA, Malone RW, Williams P, Chong W, Acsadi G, Jani A. Direct gene transfer into mouse muscle in vivo. Science. 1990;247(4949):1465-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.1690918>
8. Karikó K, Weissman D. Naturally occurring nucleoside modifications suppress the immunostimulatory activity of RNA: implication for therapeutic RNA development. Curr Opin Drug Discov Devel. 2007;10(5):523-32. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17899486/>
9. Karikó K, Muramatsu H, Welsh FA, Ludwig J, Kato H, Akira S. Incorporation of pseudouridine into mRNA yields superior nonimmunogenic vector with increased translational capacity and biological stability. Mol Ther. 2008;16(11):1833-40. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/mt.2008.200>
10. Cullis PR, Hope MJ. Lipid nanoparticle systems for enabling gene therapies. Mol Ther. 2017;25(7):1467-75. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ymthe.2017.03.013>
11. Wrapp D, Wang N, Corbett KS, Goldsmith JA, Hsieh CL, Abiona O, et al. Cryo-EM structure of the 2019-nCoV spike in the prefusion conformation. Science. 2020;367(6483):1260-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/science.abb2507>
12. Pardi N, Hogan MJ, Porter FW, Weissman D. mRNA vaccines: a new era in vaccinology. Nat Rev Drug Discov. 2018;17(4):261-79. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nrd.2017.243>





13. Polack FP, Thomas SJ, Kitchin N, Absalon J, Gurtman A, Lockhart S, et al. Safety and efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine. *N Engl J Med.* 2020;383(27):2603-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2034577>
14. Baden LR, El Sahly HM, Essink B, Kotloff K, Frey S, Novak R, et al. Efficacy and safety of the mRNA-1273 SARS-CoV-2 vaccine. *N Engl J Med.* 2021;384(5):403-16. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2035389>
15. Goel RR, Apostolidis SA, Painter MM, Mathew D, Pattekar A, Kuthuru O, et al. Distinct antibody and memory B cell responses in SARS-CoV-2 naive and recovered individuals following mRNA vaccination. *Sci Immunol.* 2021;6(58):eabi6950. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/sciimmunol.abi6950>
16. Watson OJ, Barnsley G, Toor J, Hogan AB, Winskill P, Ghani AC. Global impact of the first year of COVID-19 vaccination: a mathematical modelling study. *Lancet Infect Dis.* 2022;22(9):1293-302. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(22\)00320-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(22)00320-6)
17. Dagan N, Barda N, Kepten E, Miron O, Perchik S, Katz MA, et al. BNT162b2 mRNA Covid-19 vaccine in a nationwide mass vaccination setting. *N Engl J Med.* 2021;384(15):1412-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2101765>
18. Chivukula S, Plitnik T, Tibbitts T, Bhatt H, Bhatt V, Read A, et al. Development of multivalent mRNA vaccine candidates for seasonal or pandemic influenza. *NPJ Vaccines.* 2021;6(1):153. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41541-021-00420-6>
19. Rojas LA, Sethna Z, Soares KC, Olcese C, Savaby B, Rediti M, et al. Personalized RNA neoantigen vaccines stimulate T cells in pancreatic cancer. *Nature.* 2023;618(7963):144-50. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06063-y>
20. Qin S, Tang X, Chen Y, Chen K, Fan N, Xie W, et al. mRNA-based therapeutics: powerful and versatile tools to combat diseases. *Signal Transduct Target Ther.* 2022;7(1):166. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41392-022-01007-w>
21. Lazarus JV, Wyka K, White TM, Picchio CA, Rabin K, Ratzan SC, et al. A survey of COVID-19 vaccine acceptance across 23 countries in 2022. *Nat Med.* 2023;29(2):366-75. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02185-4>
22. Organización Mundial de la Salud. Infodemic management: a key component of the COVID-19 global response [Internet]. Ginebra: OMS; 2021 [citado 2026 feb 26]. Disponible en: <https://www.who.int/teams/risk-communication/infodemic-management>
23. Loomba S, de Figueiredo A, Piatek SJ, de Graaf K, Larson HJ. Measuring the impact of COVID-19 vaccine misinformation on vaccination intent in the UK and USA. *Nat Hum Behav.* 2021;5(3):337-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01056-1>
24. Wouters OJ, Shadlen KC, Salcher-Konrad M, Pollard AJ, Larson HJ, Teerawattananon Y. Challenges in ensuring global access to COVID-19 vaccines: production, affordability, allocation, and deployment. *Lancet.* 2021;397(10278):1023-34. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)00306-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00306-8)

