



# Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento

Año 12, Número 26, Artículo 8: 1-21. Enero - Diciembre 2024  
e-ISSN: 2007-8064



## Desafíos de la investigación nanomédica en México

## Challenges of nanomedical research in Mexico

DOI: 10.22201/enesl.20078064e.2024.26.87497  
e25.87497

Roberto Soto Vázquez <sup>a\*</sup>   
<https://orcid.org/0000-0002-1956-7045>  
Guillermo Foladori <sup>b\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0002-7441-3233>  
Edgar Záyago Lau <sup>c\*</sup>  
<https://orcid.org/0000-0002-3670-8356>

Fecha de recepción: 26 de diciembre de 2023.  
Fecha de aceptación: 22 de marzo de 2024.  
Fecha de publicación: 18 de abril de 2024.

<sup>a</sup> Autor de correspondencia  
roberto.soto@cinvestav.mx

\* Universidad Autónoma de Zacatecas.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.  
CC-BY-NC-ND



## RESUMEN

**Objetivo:** identificar los desafíos que enfrenta la investigación en nanomedicina en México según la opinión de expertos en la materia.

**Diseño metodológico:** se realizaron entrevistas semiestructuradas a investigadores mexicanos del área de nanomedicina. Los entrevistados fueron seleccionados a través de un muestreo intencional. Las entrevistas se llevaron a cabo de manera presencial y a distancia. El procesamiento de la información se realizó con el software ATLAS.ti.

**Resultados:** se identificaron desafíos en distintos rubros: financiamiento, beneficio social, recursos humanos, infraestructura, nanotoxicología, patentamiento, investigación preclínica y clínica, vinculación academia-industria, regulación, política científica y trabajo multidisciplinario.

**Limitaciones de la investigación:** las entrevistas se realizaron únicamente a investigadores. Sería necesario entrevistar a otros agentes involucrados en la cadena de valor de la nanomedicina tales como empresarios y funcionarios del sector salud.

**Hallazgos:** los principales desafíos que enfrenta la investigación nanomédica en México son el financiamiento reducido, investigaciones con poca incidencia en la sociedad, inexistencia de programas educativos específicos en nanomedicina, escaso patentamiento, nula vinculación con empresas y falta de regulación. Algunas propuestas para encarar estos desafíos se analizan en el presente trabajo.

*Palabras clave: nanomedicina, nanotecnología, investigación y desarrollo (I+D), entrevistas*

## ABSTRACT

**Purpose:** To identify the challenges faced by nanomedicine in Mexico, according to the opinion of experts in the field.

**Methodological design:** Semi-structured interviews were conducted with Mexican researchers in the field of nanomedicine. The participants were selected through purposive sampling. Interviews were both online and face-to-face. The information was processed with ATLAS.ti software.

**Results:** Challenges were identified in different areas: financing, social benefit, human resources, infrastructure, nanotoxicology, patenting, preclinical and clinical research, academia-industry linkage, regulation, scientific policy and multidisciplinary work.

**Research limitations:** Interviews included researchers only. It would be necessary to interview other agents involved in the nanomedicine chain of value, such as entrepreneurs and health sector managers.

**Findings:** The main challenges facing nanomedical research in Mexico are the following: reduced funding, research with little impact on society, lack of specific educational programs in nanomedicine, low patenting activity, weak links between academia and industry, and lack of regulation. Some proposals to address these challenges are analyzed in this paper.

*Keywords: nanomedicine, nanotechnology, research and development (R&D), interviews*

## INTRODUCCIÓN

La investigación científica en medicina tiene como propósito el desarrollo de medicamentos, vacunas y dispositivos para evitar enfermedades, superarlas o reducirlas y con ello mejorar la calidad de vida.<sup>1</sup> Un área que ha tomado gran relevancia en los últimos años dentro de la investigación médica es la nanomedicina, que consiste en la búsqueda de soluciones a problemas del sector salud haciendo uso de la nanotecnología. Las tendencias actuales de investigación en nanomedicina apuntan principalmente a las áreas de diagnóstico/imagenología, aplicaciones terapéuticas (terapias fototérmica, magnética y fotodinámica), nanomateriales antivirales y bactericidas, nanopartículas avanzadas para aplicaciones biomédicas, inmunización y producción de vacunas, medicina regenerativa con células troncales y liberación de fármacos (Li y Webster, 2023).

El interés por la investigación nanomédica ha quedado evidenciado por el incremento notable de las publicaciones científicas en el tema en los últimos años (Liu, Zou, Chen, *et al.*, 2023), así como por las inversiones millonarias en investigación y desarrollo (I+D) en nanomedicina por parte de empresas farmacéuticas multinacionales como Pfizer, Eli Lilly, Novartis y Sanofi (Martins, Neves, de la Fuente, *et al.*, 2020).

Entre los logros tangibles de la investigación nanomédica se encuentran la aprobación de más de 60 nanomedicamentos por parte de la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) y la existencia de más de 500 ensayos clínicos activos que involucran nanopartículas (Liu *et al.*, 2023). A esto hay que agregar las contribuciones recientes de la nanomedicina al combate de la pandemia de Covid-19, que consistieron principalmente en el desarrollo de vacunas y herramientas de diagnóstico (Soto Vázquez, Záyago y Maldonado, 2022), además de cubrebocas protectores contra el virus SARS-CoV-2 ela-

borados con nanotecnología (Bracamonte-Arámburo y Foladori, 2022).

## Desafíos generales de la nanomedicina

Aunque los logros anteriores parezcan contundentes, la mayor parte de la I+D en nanomedicina se encuentra a nivel de laboratorio y los casos de éxito son exigüos, lo que denota la existencia de enormes desafíos dentro del sector (Wu, Wang y Li, 2020). Por su parte, Zhang, Yan, Wang, *et al.*, (2020) refieren que los desafíos que en general enfrenta la nanomedicina tienen que ver con la seguridad de los nanomateriales, aspectos biológicos, escalamiento/costo y regulación.

El uso de nanomateriales en medicina suscita preocupaciones de seguridad por sus posibles efectos adversos en el cuerpo humano y el medio ambiente. Al tener tamaños significativamente más pequeños y áreas superficiales específicas mucho mayores que los medicamentos convencionales, los nanomateriales utilizados como materia prima interactúan con las células y los tejidos de maneras que aún no se comprenden por completo, lo que dificulta la predicción y prevención de toxicidades potenciales (Yang y Merlin, 2023). Algunos medicamentos comunes como el paclitaxel<sup>2</sup> y la doxorubicina<sup>3</sup>, que se han estudiado ampliamente, aún enfrentan complejos problemas de toxicidad cuando se usan en combinación con nanoestructuras (Zhang *et al.*, 2020). Los riesgos toxicológicos no se restringen a los nanomedicamentos, sino que también se presentan en otros productos nanomédicos. Ejemplo de ello son algunos tipos de cubrebocas elaborados con nanotecnología que se comercializaron durante la pandemia de Covid-19, los cuales, a pesar de su efectividad protectora frente al virus SARS-CoV-2, representan un riesgo a la salud y al medio ambiente debido a la toxicidad de sus componentes nanométricos y debieron ser retirados del mercado (Bracamonte-Arámburo y Foladori, 2022).

<sup>1</sup> Mientras el propósito en sí mismo es la calidad de vida, bajo relaciones capitalistas la ciencia médica tiene el propósito para-sí de incrementar la ganancia del capital invertido. Dicho de otra forma, el propósito material concreto de la investigación y desarrollo (I+D) es el medicamento, la vacuna, etc. Sin embargo, esa actividad de I+D depende y está comandada por otra, a la cual se subordina: la inversión de capital para obtener una ganancia. Esta dupla de actividades se manifiesta cotidianamente entre la fuerza del mercado sobre la medicina y la fuerza de la vida por mejorar la salud. La primera subordina a la segunda (Foladori, 2022).

<sup>2</sup> El paclitaxel se usa principalmente en el tratamiento de cáncer de ovario y mama (Aronson, 2016).

<sup>3</sup> La doxorubicina tiene una amplia actividad contra las neoplasias humanas, incluidas las leucemias agudas, los linfomas malignos y varios tumores sólidos, en particular el cáncer de mama (Agrawal, 2008).

La toxicidad de los desarrollos nanomédicos puede evaluarse a través de métodos *in vitro*, *in silico* e *in vivo*. Los métodos *in vitro* son aquellos que se realizan en laboratorio y que no involucran seres vivos, excepto como donantes de células u órganos, y las pruebas se hacen en cultivos celulares u órganos aislados (Leist, Hasiwa, Daneshian, *et al.*, 2012). Estos métodos son ampliamente utilizados debido a su rapidez, reproducibilidad, facilidad de control y bajo costo (Sayes y Child, 2015).

Los métodos *in silico* permiten predecir la toxicidad a través de modelos computacionales y su aplicación va desde las etapas más tempranas del desarrollo de fármacos, donde un compuesto solo necesita existir virtualmente para que se pueda probar, hasta la evaluación de riesgos en casos donde el tiempo es limitado y las pruebas *in vivo* e *in vitro* no son factibles (Hemmerich y Ecker, 2020). Los métodos *in silico* son baratos y rápidos.

Los métodos *in vivo* evalúan la toxicidad en modelos animales y en humanos a través de estudios de biodistribución, hematología, química sérica e histopatología, entre otros;<sup>4</sup> y aunque sus resultados son más precisos, ya que se tiene en cuenta la actividad de los nanomateriales dentro de un sistema biológico, son lentos, costosos y éticamente limitados, al enfrentarse a críticas ético-jurídicas relacionadas al derecho de los seres sintientes (Maji, Mahajan, Sriram, *et al.*, 2022; von Ranke, Barros, Lima, *et al.*, 2022).

Por estas razones, cada vez hay una mayor preferencia hacia los métodos *in vitro* e *in silico*; no obstante, estos modelos no pueden ofrecer información certera sobre el destino de absorción, distribución, metabolismo y excreción de los nanomateriales (Lama, Merlin-Zhang y Yang, 2020), de modo que los estudios *in vivo* siguen siendo imprescindibles.<sup>5</sup>

Además de la seguridad de los nanomateriales, se reportan otros desafíos de la nanomedicina concernientes a cuestiones biológicas, escalamiento de las investigaciones y regulación. Los desafíos biológicos involucran principalmente la biodistribución de fármacos y las ba-

rreras biológicas. La biodistribución es un factor relevante para mejorar la acumulación de los fármacos en el sitio objetivo y reducir la acumulación en tejidos sanos, pero esta se ve afectada por las interacciones con barreras biológicas, tanto externas (piel, órganos) como internas (celulares). Por tanto, la interacción entre nanofármacos y barreras biológicas debe estar bien caracterizada, así como sus impactos en la seguridad y eficacia de los nanomedicamentos (C. Zhang *et al.*, 2020). En algunos casos el destino final en el organismo (órgano, tejido, etc.) de los fármacos nanoproducidos no es igual al destino del mismo fármaco en tamaño macro, algo que hace también complicada la seguridad del medicamento (Foladori e Invernizzi, 2021).

En cuanto al escalamiento de las investigaciones, los desafíos estriban en la reproducibilidad de síntesis a nivel industrial, los altos costos de producción y el control de calidad, los cuales son más complejos en los nanofármacos en comparación con los de otros productos farmacéuticos (Younis, Tawfeek, Abdellatif, *et al.*, 2022).

Ante los riesgos toxicológicos que se comentaron con anterioridad, es necesario contar con regulaciones que garanticen la seguridad, eficacia y calidad de los productos nanomédicos. El principal desafío en este tema es la falta de regulaciones específicas para nanomedicina. Actualmente los nanomedicamentos se controlan aplicando las mismas regulaciones que existen para los medicamentos convencionales, y aunque algunos organismos regulatorios como la FDA, la Agencia Europea de Medicamentos (EMA, por sus siglas en inglés) y el Ministerio de Salud, Trabajo y Bienestar de Japón (MHLW, por sus siglas en inglés) han publicado documentos con recomendaciones sobre productos médicos que contienen nanotecnología, estos son voluntarios, no obligatorios (Domingues, Santos, Alvarez-Lorenzo, *et al.*, 2022).

## Nanomedicina, tecnologías emergentes y políticas públicas

La nanomedicina es una de las principales tecnologías emergentes dentro del sector salud. Las tecnologías emergentes se definen como aquellas que son radicalmente novedosas, de crecimiento rápido y que tienen el potencial de crear nuevas industrias o transformar las ya existentes (Rotolo, Hicks y Martin, 2015); algunos ejem-

<sup>4</sup> Es común que existan llamados públicos para experimentar medicamentos en voluntarios humanos con enfermedades raras. La experimentación en humanos ha sido una constante en los ejércitos, algunas veces sin consentimiento apropiado o bajo presión; también en niñas y niños, y adolescentes en edad escolar a quienes se les obliga a recibir vacunas para poder cursar las escuelas públicas. Existe abundante literatura al respecto.

<sup>5</sup> Durante la pandemia de la Covid-19 se mataron decenas de miles de monos en experimentación para las diferentes vacunas (S. Zhang, 2020).

plos de estas son la biotecnología, la biología sintética y la nanotecnología. Si bien es cierto que las tecnologías emergentes prometen mejorar la calidad de vida, también conllevan desafíos tales como sus potenciales riesgos para la salud y el medio ambiente (Allhoff, 2009), inequidad en sus beneficios (Cozzens, 2012) y preocupaciones éticas (Wright, Finn, Gellert, *et al.*, 2014). En este sentido, los científicos pueden aportar información sobre los riesgos y beneficios de estas tecnologías, lo cual es útil en la elaboración de políticas públicas (Kim, 2022). La participación de los científicos en el diseño de políticas es cada vez más importante debido a la necesidad de contar con evidencia científica en la toma de decisiones (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2015).

Los desafíos que enfrenta la nanomedicina pueden ser similares a los de otras tecnologías emergentes. Asimismo, las opiniones de los investigadores sobre tales desafíos pueden dar lugar a recomendaciones de política pública en materia de ciencia y tecnología. Debido a esto, es conveniente analizar los trabajos previos que se han hecho al respecto.

A continuación se presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el papel de los científicos en la formulación de políticas públicas para las tecnologías emergentes. Una revisión sistemática implica la consulta de fuentes de información relevantes mediante la aplicación de métodos transparentes y reproducibles (Lame, 2019). En concordancia con lo anterior, se realizó una búsqueda de publicaciones en Web of Science y Scopus (las principales bases de datos científicas a nivel internacional) y se aplicaron los criterios de búsqueda mostrados en la tabla 1.

**Tabla 1. Criterios de búsqueda empleados en la revisión de la literatura**

Base de datos bibliográfica	Términos de búsqueda
Web of Science	ALL=((scientists OR researchers) AND "emerg* technolog*" AND ("public policy" OR "public policies" OR policymaking))
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((scientists OR researchers) AND "emerg* technolog*" AND ("public policy" OR "public policies" OR policymaking))

Fuente: elaboración propia.

La búsqueda arrojó 20 resultados en Web of Science y 29 en Scopus. Se realizó una revisión cuidadosa de cada uno de los documentos localizados, descartando los que estaban repetidos y los no relacionados con el tema. Este proceso de depuración dio como resultado la selección de artículos mostrada en la tabla 2 con la cual se llevó a cabo la revisión de la literatura. En dicha tabla se especifican los temas estudiados, los tipos de tecnologías emergentes, los métodos utilizados y los principales hallazgos de cada artículo. La mitad de ellos versa sobre nanotecnología y el resto se dirige a otras tecnologías emergentes como *big data*, neuroimagenología médica y células troncales. Los temas abordados comprenden la participación de científicos en política, el papel de la ciencia en el debate público, la investigación e innovación responsables y la aplicación de las ciencias sociales en la evaluación de tecnologías emergentes.

Las tecnologías emergentes identificadas en la revisión de la literatura se asemejan a la nanomedicina en el sentido de que sus beneficios van acompañados de potenciales riesgos o efectos no deseados. Por ejemplo, la tecnología de *big data* ofrece la posibilidad de procesar enormes volúmenes de información en un tiempo reducido y ello abre oportunidades de aplicación en áreas tan diversas como medicina, comercio, investigación científica, etc.; pero existen riesgos respecto a privacidad y seguridad (Youtie, *et al.*, 2017). En este contexto, es deseable que los científicos participen en el diseño de políticas públicas sobre tecnologías emergentes para lograr una mejor gestión de los beneficios y riesgos; no obstante, el nivel de involucramiento de los investigadores en política científica, así como sus percepciones sobre asuntos como regulación, se ven influenciados por valores, creencias y antecedentes personales (Kim, Corley y Scheufele, 2017; Su *et al.*, 2016).

Otro tema que aparece en la revisión de la literatura es la investigación e innovación responsables (RRI, por sus siglas en inglés), concepto que se refiere a la incorporación adecuada de los conocimientos científicos y avances tecnológicos en la sociedad tomando en cuenta la sustentabilidad, la ética y el beneficio social (Von Schomberg, 2011). Cabe decir que en la RRI no solo intervienen expertos en las tecnologías emergentes en cuestión, sino también científicos de las ciencias sociales (Youtie *et al.*, 2017). Algunas tecnologías emergentes donde se ha analizado la implementación de RRI son la

Tabla 2. Artículos científicos consultados en la revisión de la literatura

Referencia	Tecnología emergente	Tema	Métodos	Principales hallazgos
Merck, Grieger y Kuzma (2022)	Nanotecnología en agricultura	Investigación e innovación responsables en tecnologías emergentes	Análisis teórico	Se plantean recomendaciones de política pública para institucionalizar la investigación responsable sobre nanoagroalimentos.
Kim, Corley y Scheufele (2017)	Nanotecnología	Participación de los investigadores en política científica	Encuestas por correo electrónico	La mayoría de los investigadores encuestados se muestra a favor de participar en política científica. La percepción de los investigadores sobre este tema se ve influenciada por sus valores, creencias y antecedentes.
Youtie, Porter y Huang (2017)	Big data	Ciencias sociales en la evaluación de tecnologías emergentes	Análisis bibliométrico	Se resalta el papel de los científicos sociales en la evaluación de tecnologías emergentes. Se identifican áreas temáticas en la investigación en ciencias sociales sobre big data.
Su, Caccioatore, Brossard, et al., (2016)	Nanotecnología	Actitudes políticas de los científicos y público no especializado en tomo a la nanotecnología	Encuestas por correo electrónico	La mayoría de los científicos encuestados apoya la regulación de la nanotecnología en el ámbito comercial, pero muestra un menor apoyo a la regulación en el ámbito académico.
Arentshorst Buning, Boon, et al., (2015)	Neuroimagenología médica	Investigación e innovación responsables en tecnologías emergentes	Entrevistas semiestructuradas y grupos focales	Se identifican beneficios y riesgos de la neuroimagenología médica.
Lysaght y Kerridge (2012)	Células troncales	Papel de la ciencia en el debate público sobre investigación con células troncales	Investigación documental y entrevistas a profundidad	En los debates públicos la ciencia es utilizada como herramienta discursiva y retórica.

Fuente: elaboración propia.

neuroimagenología médica (Arentshorst *et al.*, 2015) y la nanotecnología agrícola (Merck *et al.*, 2022).

La mayoría de los artículos revisados incluyen en su metodología entrevistas en sus distintas modalidades (entrevistas semiestructuradas, entrevistas a profundidad, grupos focales y encuestas), lo que demuestra la utilidad de estos instrumentos en las investigaciones sociales de la ciencia.

## Objetivo de la investigación

En las secciones anteriores se expusieron algunos desafíos generales que enfrenta la nanomedicina a nivel internacional, según lo reportado en la literatura; pero se tiene poca información sobre los desafíos específicos que enfrenta la nanomedicina en México. Asimismo, se resaltó el papel de los investigadores en la formulación de políticas públicas en materia de tecnologías emergentes. Esto conduce a plantear las siguientes preguntas de investigación: 1) ¿cuáles son los desafíos que enfrenta la nanomedicina en México desde el punto de vista de los

investigadores?, 2) ¿qué propuestas de solución plantean los investigadores para hacer frente a estos desafíos?

El objetivo de este trabajo es indagar los desafíos de la nanomedicina en México a través de entrevistas a investigadores y plantear propuestas de solución que en un futuro puedan incidir en el diseño de políticas públicas de ciencia y tecnología.<sup>6</sup>

## METODOLOGÍA

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a expertos mexicanos en el campo de la nanomedicina para conocer su punto de vista sobre los desafíos que enfrenta la investigación nanomédica en el país. Las entrevistas semiestructuradas son uno de los principales métodos de recolección de datos en la investigación cualitati-

<sup>6</sup> Este trabajo se desprende de una investigación doctoral sobre las actividades de I+D de la nanomedicina en México (Soto, 2023a, 2023b) y complementa otros estudios previos donde se llevaron a cabo entrevistas a investigadores (Ortiz, Foladori y Bracamonte, 2022; Soto y Foladori, 2023), todo ello realizado dentro del Proyecto CONAHCYT Ciencia de Frontera 2019 - 304320 (www.relans.org).

va, y consisten en un diálogo entre el investigador y el participante siguiendo un guión flexible de preguntas (DeJonckheere y Vaughn, 2019).

A través de un muestreo intencional se delimitó una muestra de 57 expertos mexicanos en nanomedicina compuesta por investigadores, representantes de la iniciativa privada y funcionarios del sector salud. A cada uno de ellos se les envió por correo electrónico una invitación para participar en el estudio. Los que aceptaron fueron informados sobre los lineamientos a seguir en las entrevistas (participación voluntaria y no remunerada, protección del anonimato de los participantes y autorización para grabar el audio de las entrevistas) y otorgaron su consentimiento a través de una carta firmada o lo expresaron verbalmente antes de comenzar las entrevistas.

Las entrevistas se realizaron en el segundo semestre de 2022 y se llevaron a cabo de manera presencial y virtual, en función de la ubicación de los participantes y las restricciones de distanciamiento por Covid-19 aún presentes en ese momento. Las entrevistas virtuales se realizaron a través de Zoom, un software de videoconferencias por internet que ya ha sido empleado exitosamente en entrevistas de investigación (Archibald, Ambagtsheer, Casey y Lawles, 2019; Gray, Wong-Wylie, Rempel y Cook, 2020; Oliffe, Kelly, González y Yu, 2021). La grabación del audio, en el caso de las entrevistas vía Zoom, se realizó con el mismo software y, en el caso de las entrevistas presenciales, con un teléfono celular.

Las entrevistas se basaron en un guión de preguntas que cubrió los antecedentes de los entrevistados y sus opiniones respecto a los desafíos de la nanomedicina en México. Algunas preguntas estuvieron dirigidas a desafíos específicos que ya han sido reportados previamente en la literatura, tales como la seguridad de los nanomateriales en medicina (Yang y Merlin, 2023), elevados costos de la I+D (Younis *et al.*, 2022) y falta de regulación (Zhang *et al.*, 2020); pero también se incluyeron preguntas abiertas para indagar qué otros desafíos perciben los entrevistados.

Finalmente, el audio de las entrevistas se transcribió a texto y el análisis de la información se realizó con el software ATLAS.ti 9.1.3 siguiendo la metodología propuesta por Lopezosa, Codina y Freixa, (2022).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la muestra inicial de 57 expertos en nanomedicina, 11 de ellos aceptaron ser entrevistados, lo cual representa una tasa de respuesta del 19%, valor que se encuentra dentro del rango esperado para este tipo de estudios (Lund, 2023).

En la tabla 3 se muestra el perfil de los entrevistados. Todos ellos son investigadores; no hubo participación de representantes del sector salud ni del empresarial a pesar de que estos grupos también fueron incluidos en la muestra inicial. Para mantener el anonimato de los entrevistados se omitieron sus nombres y se les asignaron códigos compuestos por la letra “E” de “entrevistado” seguida de un número arábigo: E1, E2, ... E11. En este mismo sentido, se omitieron sus instituciones de adscripción, y solamente se indica el tipo de institución de acuerdo con la clasificación que establece la Subsecretaría de Educación Superior de México (s/f). 64 % de las personas entrevistadas son mujeres y 36 % son hombres. Sus líneas de investigación comprenden la aplicación de la nanotecnología en diversas áreas de la medicina: liberación de fármacos, vacunas, diagnóstico y tratamiento de distintas enfermedades.

Las entrevistas revelaron que la investigación nanomédica en México enfrenta desafíos en distintos rubros: financiamiento, beneficio social, recursos humanos, infraestructura, nanotoxicología, patentamiento, investigación preclínica y clínica, vinculación academia-industria, regulación, política científica y trabajo multidisciplinario (figura 1).

A continuación se detallan los tipos de desafíos.

### Desafíos de financiamiento

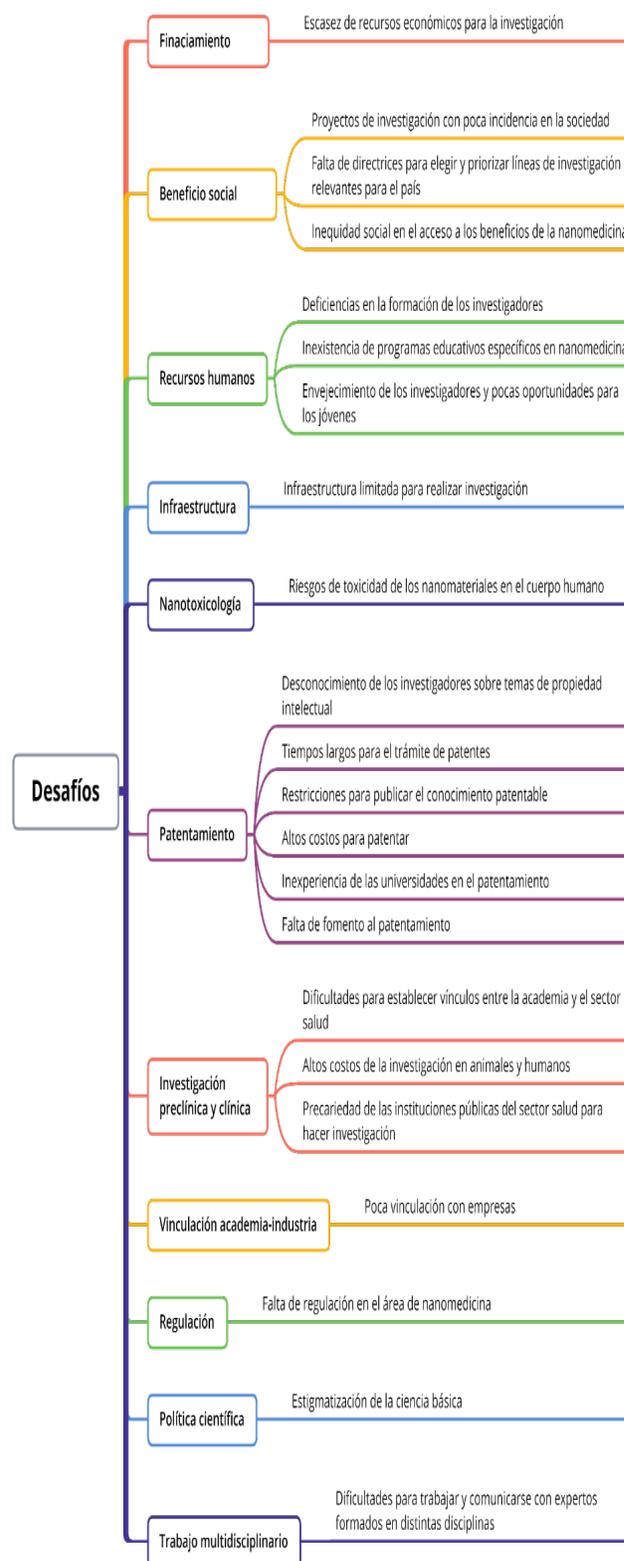
Los entrevistados señalan que el principal desafío en este rubro es la escasez de recursos económicos para hacer investigación. La mayoría financia sus investigaciones con recursos públicos provenientes del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT); sin embargo, declaran que en los últimos años este financiamiento se ha visto reducido. Así lo expresan algunos de los entrevistados:

Tabla 3. Perfil de los investigadores entrevistados

Investigador	Género	Formación académica	Adscripción	Línea de investigación
E1	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ciencia de Materiales</li> <li>Ingeniería Química</li> </ul>	Centro público de investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de materiales para uso médico.</li> </ul>
E2	♂	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ingeniería Química</li> <li>Maestría en Ingeniería Química</li> <li>Ingeniería Bioquímica</li> </ul>	Universidad pública estatal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanobiotecnología.</li> </ul>
E3	♂	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en fisiología</li> <li>Maestría en Ciencias</li> <li>Médico Cirujano</li> </ul>	Centro público de investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nanomedicina y terapia génica para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson y tumores.</li> </ul>
E4	♂	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ciencias Químicas</li> <li>Maestría en Ciencias Químicas</li> <li>Licenciatura en Química Industrial</li> </ul>	Universidad pública estatal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación de nanomateriales en:</li> <li>Control de enfermedades crónico-degenerativas (diabetes mellitus).</li> <li>Regeneración tisular en heridas y quemaduras.</li> <li>Odontología.</li> </ul>
E5	♂	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ciencia y Tecnología de Polímeros</li> <li>Maestría en Química</li> <li>Ingeniería Química</li> </ul>	Centro público de investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preparación y caracterización de nanopartículas poliméricas cargadas con fármacos para el tratamiento del cáncer.</li> </ul>
E6	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ciencia de Materiales</li> <li>Maestría en Ciencia de Materiales</li> <li>Ingeniería Química</li> </ul>	Centro público de investigación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Liberación de fármacos con nanopartículas tipo core-shell.</li> </ul>
E7	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ciencias Químicas</li> <li>Maestría en Ciencias Químicas</li> <li>Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica</li> </ul>	Universidad pública federal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de sistemas de liberación de fármacos en la nanoescala.</li> </ul>
E8	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Ingeniería de Materiales</li> <li>Maestría en Química Inorgánica</li> <li>Ingeniería Química</li> </ul>	Universidad pública federal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Síntesis de nanopartículas metálicas y cerámicas con bioaplicaciones en liberación de fármacos, diagnóstico y tratamiento.</li> </ul>
E9	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Bioquímica Estructural</li> <li>Maestría en Microbiología-Biotecnología</li> <li>Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica</li> </ul>	Universidad pública federal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uso de nanoestructuras biomiméticas para atender problemas de biomedicina.</li> <li>Liberación de fármacos a través de nanoestructuras.</li> <li>Vacunas y diagnósticos basados en nanotecnología.</li> </ul>
E10	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Física Médica</li> <li>Ingeniería Biomédica</li> </ul>	Otro tipo de institución pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de nanopartículas radiomarcadas para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.</li> </ul>
E11	♀	<ul style="list-style-type: none"> <li>Doctorado en Física Médica</li> <li>Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica</li> </ul>	Otro tipo de institución pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desarrollo de nanopartículas radiomarcadas para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Desafíos de la investigación nanomédica en México



Fuente: elaboración propia.

E5: “Cada vez hay menor disponibilidad de recursos para hacer investigación. Antes nosotros recurríamos a los proyectos de CONAHCYT de ciencia básica [...] estábamos terminando un proyecto de ciencia básica y ya estábamos preparando el otro para continuar con el acceso a los apoyos económicos. Y así operamos por años, pero ahora se está batallando mucho para conseguir recursos”.

E8: “Se nos cortó muchísimo el apoyo del gobierno a las investigaciones, muchísimo. Eso nos ha pegado bastante porque, como te decía, la nanomedicina es un área de investigación muy cara, muy costosa”.

En este mismo sentido, otro de los entrevistados menciona que la reducción de apoyos económicos a la investigación ha estado relacionada con la pandemia de Covid-19 y que esto ocurre no solamente en México, sino también en otras partes del mundo, incluso en países desarrollados:

E3: “Ha habido poco financiamiento por parte de CONAHCYT. Y no es porque CONAHCYT no quiera, lo que pasa es que los recursos se destinaron a atender la emergencia de Covid-19 [...] Es loable, es aceptable, que parte de los recursos se vayan para salvar prioridades nacionales de salud. Ahora que se controló la pandemia estoy viendo que CONAHCYT ya empieza a apoyar proyectos [...] También he tenido donativos del extranjero, pero ahora los extranjeros están igual o peor que nosotros, por más ricos que sean. Para poner un ejemplo, ahorita Estados Unidos, Francia o Alemania tienen otras prioridades: el terrorismo, la guerra contra Ucrania, etc. Entonces, el apoyo a la investigación también ha mermado mucho en el mundo, y sobre todo ahora por la pandemia. Por sentido lógico, por sentido común, los recursos se destinaron a desarrollar vacunas, métodos diagnósticos para Covid-19, etc. Entonces, la investigación básica sufrió mucho”.

El problema de la reducción del financiamiento público a la investigación se agrava por el hecho de que, como se verá más adelante, hay poca vinculación de la academia con la industria, lo que limita la posibilidad de recibir financiamiento del sector privado.

## Desafíos de beneficio social

Los entrevistados refieren que algunos de los desafíos que se enfrentan en este rubro son la poca incidencia social de los proyectos de investigación y la falta de directrices para elegir y priorizar líneas de investigación relevantes para el país. A este respecto, uno de los investigadores comenta:

E2: “Hay mucha gente que trabaja con materiales supercomplicados de sintetizar y que no van a servir para nada. Deberíamos tener una visión, alguien debería de tomar la decisión de qué materiales son más promisorios y sobre de ellos trabajar”.

La crítica que hace E2 sobre la síntesis de nanomateriales que tienen poca o nula utilidad también ha sido expresada por algunos autores. Lammers y Ferrari (2020) sostienen que el objetivo de la nanomedicina no debería ser la producción de nanomateriales cada vez más complejos, sino la utilización de la nanotecnología en descubrimientos de vanguardia que tengan un impacto real en la práctica clínica, porque al final, para los pacientes y médicos lo relevante es que los tratamientos funcionen, independientemente de que éstos se basen o no en nanotecnología.

Por otra parte, el beneficio social de la investigación médica puede analizarse a partir de las enfermedades de las que se ocupa, ya que ello permite corroborar si las agendas de investigación están alineadas con las demandas de salud pública (Røttingen, Regmis, Young, *et al.*, 2013). Por tal motivo, se les preguntó a los entrevistados cuáles son las enfermedades o padecimientos en los que tendría que enfocarse la investigación nanomédica en México. En la figura 2 se muestra una nube de palabras con las respuestas obtenidas. Las enfermedades con más menciones fueron la diabetes, el cáncer y las crónico-degenerativas. Estas respuestas son congruentes con la realidad que enfrenta México en materia de salud, pues la diabetes y el cáncer, junto con las enfermedades del corazón, constituyen las principales causas de muerte en el país (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2023). No obstante, una de las investigadoras entrevistadas también señaló la importancia de ocuparse de las enfermedades desatendidas, es decir, aquellas que afectan a la gente más pobre:

E9: “Yo creo que habría que poner mayor atención a enfermedades que han sido desatendidas: por un lado, las ligadas a la pobreza, y por otro, las enfermedades locales. Estas enfermedades han sido desatendidas por sectores de investigación. Países que tienen mayores herramientas para hacer investigación se han adentrado en las enfermedades que afectan a primer mundo, no muchas veces a la población más pobre. Es el caso de la tuberculosis, enfermedad que está ligada a personas en situación de pobreza. La tuberculosis ataca a personas con bajas defensas inmunológicas; entonces, en general, son personas con desnutrición. Esta enfermedad se había desatendido mucho y ahora le están prestando mayor atención, sin embargo, no se le da la misma atención que, por ejemplo, a Covid-19, en donde la enfermedad dio por igual a todo tipo de países. Pero esto no quiere decir que no se deban atender otras enfermedades que también nos afectan. Las enfermedades crónico-degenerativas son muy importantes y también es importante evaluar tratamientos y otro tipo de desarrollos en población mexicana. Entonces, en realidad, todo sería importante, pero no hay que olvidar las enfermedades desatendidas”.

El papel de la nanomedicina en el tratamiento de las enfermedades desatendidas ha sido discutido en otros trabajos. Chang, Harford, Eaton, *et al.*, (2015) señalan que la nanomedicina podría contribuir al tratamiento de enfermedades infecciosas como la malaria y la tuberculosis, o enfermedades tropicales desatendidas como la leishmaniasis, las cuales afectan predominantemente a regiones pobres como África; sin embargo, estas enfermedades tienen poca presencia en las agendas de investigación debido a que se le ha dado prioridad a los problemas de salud de los países desarrollados (Woodson, 2016).

Figura 2. Nube de palabras. Enfermedades que deberían ser abordadas por la nanomedicina según los entrevistados



Fuente: elaboración propia.

Nota: el tamaño de las palabras es proporcional a su frecuencia de mención en las respuestas.

También se preguntó a los entrevistados cuál grupo de la población consideran que se beneficia con el trabajo de investigación que ellos realizan. En la figura 3 se muestran las respuestas obtenidas. La mayoría de los entrevistados dijo que se beneficia la población en general porque todas las personas pueden tener un problema de salud. Otras respuestas apuntan a pacientes con enfermedades específicas relacionadas con las líneas de investigación de los entrevistados: cáncer, Parkinson y tuberculosis. Asimismo, algunos entrevistados dijeron que todavía no se beneficia a ningún grupo de la población, o que solo se beneficia a los estudiantes que se gradúan en los laboratorios, debido a que la investigación es básica y sus resultados aún no se trasladan a la clínica. Otra respuesta fue que los más beneficiados son las personas de mayor poder adquisitivo:

E8: “Son muy pocas las personas que se pueden beneficiar. Lamentablemente, como lo mencioné antes, todo esto de la nanomedicina es muy caro y poca gente tiene acceso a ello por los altos costos. Entonces, se benefician pocas personas de la población: las que tienen un mayor poder adquisitivo. Tristemente así es”.

Lo que menciona E8 constituye un desafío de inequidad social en el acceso a la nanomedicina. En este sentido, Graur, Elisei, Szasz, *et al.*, (2011) advierten que los costos elevados de los productos nanomédicos excluyen a la gente más pobre de los beneficios de la nanomedicina y ello podría ampliar la brecha entre los sistemas de salud de los países desarrollados y subdesarrollados.

**Figura 3. Nube de palabras. Grupos de población beneficiados por la investigación nanomédica**



Fuente: elaboración propia.

Nota: el tamaño de las palabras es proporcional a su frecuencia de mención en las respuestas.

## Desafíos de recursos humanos

En el rubro de recursos humanos, uno de los entrevistados considera que hay deficiencias en la formación de los investigadores:

E2: “Yo percibo que los investigadores, aun cuando trabajen en nano, tienen deficiencias en conocimientos básicos [...] Para mí es bien claro que mucha de la gente no tiene idea de qué es un sistema nanométrico más allá de las dimensiones, entonces falta capacitación real sobre la gente que actualmente trabaja con nano”.

Lo expresado por E2 pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la educación y capacitación de los nanotecnólogos. A este respecto, Jackman, Cho, Lee, *et al.*, (2016) señalan que los programas educativos en nanotecnología, desde licenciatura hasta posgrado, deberían contar con modelos pedagógicos creativos e innovadores que combinen el aprendizaje en el aula con la capacitación intersectorial y las experiencias internacionales, a fin de formar adecuadamente a la próxima generación de científicos en nanotecnología.

Otros desafíos relacionados con recursos humanos son la inexistencia de programas educativos específicos en nanomedicina, el envejecimiento de los investigadores y la falta de oportunidades para los jóvenes que desean incursionar en la investigación. Con relación a esto último, una de las investigadoras expresa:

E9: “En mi institución la planta académica ha envejecido. A pesar de algunos programas de rejuvenec-

cimiento de la planta académica, la edad promedio no baja de los 50 años. Eso es un problema que tal vez ahora no se visualice tanto, pero quiere decir que pocos jóvenes están logrando entrar”.

El problema que refiere E9 sobre la poca inserción laboral de los jóvenes investigadores en la academia no es exclusivo de la nanomedicina y se extiende a otras áreas científicas. Los puestos de investigación en las instituciones públicas de México son insuficientes para el número cada vez más creciente de posgraduados, y si a esto se le suma el hecho de que la industria en México tiene poco interés en realizar investigación, las oportunidades para los jóvenes investigadores son muy reducidas (Quezada-Ramírez y Chin-Chan, 2021).

## Desafíos de infraestructura

En cuanto a la infraestructura para hacer investigación, algunos investigadores declaran que ésta es limitada en sus instituciones, y ello repercute en el avance de las líneas de investigación y en la formación de recursos humanos:

E4: “Tenemos poca infraestructura en la universidad y no contamos con ciertos equipos que se requieren para estudiar las propiedades fisicoquímicas de los nanomateriales”.

E10: “Creo que falta apoyar a las instituciones en infraestructura para que esto siga siendo evolutivo. De lo contrario, nos vamos a estancar en algo donde ya no vamos a lograr avanzar ni seguir generando recursos humanos para que las investigaciones sigan creciendo y sigan siendo de punta. Es importante apoyar, no sólo al investigador, sino también a las instituciones para mejorar su infraestructura”.

A esto hay que agregar la dependencia que tiene México con el extranjero para adquirir infraestructura de investigación. En un trabajo previo se encontró que los equipos técnicos más valiosos que emplean los investigadores mexicanos en el área de nanomedicina son principalmente de fabricación extranjera y la mayoría

de éstos requieren de personal calificado del extranjero para su mantenimiento (Ortiz *et al.* 2022).

## Desafíos de nanotoxicología

La nanotoxicología es la disciplina que se encarga de estudiar los efectos adversos de los nanomateriales en los organismos vivos y en el ambiente (Millán-Chiu, Rodríguez-Torres y Loske, 2020). En este rubro los entrevistados mencionaron la existencia de posibles riesgos en el uso de nanomateriales dentro del cuerpo humano y la necesidad de ampliar el conocimiento en esta área:

E2: “Una de las cosas que ha quedado pendiente es la evaluación apropiada de la toxicidad de las nanopartículas en modelos que ya sean más grandes, en modelos [inaudible]... ¿En dónde terminan esas nanopartículas? Hay que contestar esas preguntas de qué hizo el cuerpo con ellas. Entonces, toda esta parte de nanotoxicología, desde mi punto de vista, está en pañales en México”.

E7: “La nanotoxicología es un área muy interesante de estudio que, desde mi perspectiva, tendría que tener una presencia mucho más fuerte porque la investigación en nanomedicina se ha enfocado en construir plataformas combinando diversos componentes y explotando sus propiedades en la nanoescala; sin embargo, esto no necesariamente refleja lo que sucedería dentro de una célula, dentro de un tejido o dentro de un órgano. Entonces, hay muchas cosas que aún se desconocen y que es necesario y urgente investigar: saber qué es lo que pasaría con una nanopartícula dentro del cuerpo, si se elimina o si queda atrapada; qué sucedería si se queda ahí por X tiempo. Y cuando se elimina ¿qué pasaría? ¿qué pasaría en las aguas residuales o en la interacción con el ecosistema? En fin, hay muchísimas cosas que averiguar todavía. De hecho, muchos de los nanofármacos que llegan a fases clínicas de investigación, en algún momento regresan a estudios preclínicos porque generan respuestas que no se tenían consideradas, y eso significa que todavía nos falta aprender mucho sobre las interacciones de un nanomaterial con las interfases biológicas”.

La necesidad de profundizar en el estudio de la nanotoxicología también ha sido evidenciada en otros trabajos. Por ejemplo, Domingues *et al.* (2022), a través de una consulta de Web of Science, rastrearon las publicaciones relativas a nanomedicina y nanotoxicología aplicada a nanomedicina; en el primer caso encontraron 36 278 publicaciones y en el segundo apenas 5 570, lo cual refleja la poca atención que ha recibido la nanotoxicología en la investigación nanomédica.

## Desafíos de patentamiento

En el ámbito de la salud, las patentes son una de las principales figuras de propiedad intelectual que se emplean en la traslación de la investigación básica a las aplicaciones clínicas (Granados y Joly, 2015).<sup>7</sup> En este sentido, los entrevistados mencionaron la existencia de varios desafíos para patentar: desconocimiento de los investigadores sobre temas de propiedad intelectual, tiempos largos para el trámite de patentes, restricciones para publicar el conocimiento patentable, altos costos para patentar, inexperiencia de las universidades en temas de propiedad intelectual y falta de fomento al patentamiento.

Uno de los entrevistados, que tiene varias patentes otorgadas sobre nanomedicina, explica así las dificultades que ha tenido que enfrentar en el proceso de patentamiento:

E3: “Una de las primeras dificultades es que mi producción científica bajó mucho [debido a las restricciones para publicar el conocimiento patentable]. Y casi las evaluaciones las pasaba yo de panzazo, como decimos, nada más lo mínimo necesario para poder tener las becas que te mencioné [becas de exclusividad y estímulos económicos del Sistema Nacional de Investigadores] [...] La otra es que las patentes son muy caras, entonces uno busca financiamientos que puedan registrar patentes, sobre todo las internacionales cuando menos en dos paí-

<sup>7</sup> Las patentes no sólo son instrumentos para la transferencia tecnológica, también son un medio del que se valen las grandes corporaciones para mantener el control de los medicamentos en el mercado. Con el advenimiento de la nanomedicina, incluso algunos fármacos cuya patente ha vencido pueden dar lugar a nuevas patentes si se manipulan en la nanoescala (Foladori, 2007).

ses ¿y por qué no en más? porque ya no ajusta el presupuesto [...] Y luego viene toda la parte, que es otro calvario peor, de estar registrando patentes internacionalmente y luego tener que estar manteniendo las membresías actualizadas. La patente no es nada más solo registrarla, sino que hay que estar pagando una cuota anual para que estén vigentes durante 20 años, que es lo que dura una patente nacional o internacional. Y luego viene la otra parte, ahora buscar socios en la industria para poder llevar el conocimiento a la práctica. Y todo es angustia, no hay mecanismos en México para hacerlo más fácil, más rápido”.

En este sentido, Vega-González y Hernández-Jardines (2018) analizaron los procesos de patentamiento en México a través de datos empíricos y encontraron que los costos para solicitar y obtener una patente son considerables y el tiempo para obtener un título de patente puede prolongarse hasta seis años. Además, en muchos casos se requiere asesoramiento de personal especializado en temas de propiedad intelectual. Para afrontar estos problemas, Vega-González y Hernández-Jardines proponen la elaboración adecuada de presupuestos y analizar la posibilidad de emplear otras figuras de propiedad intelectual (marcas, derechos de autor, modelos de utilidad, diseños o secretos industriales) que permiten proteger las invenciones a costos y tiempos menores.

### Desafíos en la investigación preclínica y clínica

El proceso de I+D de un producto nanomédico involucra etapas de investigación preclínica (pruebas en modelos animales) e investigación clínica (pruebas en humanos), para lo cual se requiere una estrecha vinculación de las instituciones de investigación con el sector salud. Es precisamente en este punto donde los entrevistados señalan un desafío importante: la dificultad para establecer tales vínculos. Algunos investigadores declararon que han buscado colaborar con instituciones de salud, pero esto no ha sido posible debido a obstáculos burocráticos y al desinterés por parte de los funcionarios de dichas instituciones. Otro desafío es la precariedad de las instituciones

públicas de salud para hacer investigación, tal como lo expuso uno de los entrevistados:

E4: “Nuestras instituciones de salud están por los suelos [...] si no tienen para una silla o una cama para el paciente, mucho menos tienen dinero para realizar investigación en nanomedicina. La síntesis de cualquier nanomaterial, por muy simple que sea, es cara. Y desgraciadamente nuestro sector salud en estos momentos no está para eso”.

A pesar de estas dificultades, otros de los entrevistados han logrado entablar colaboraciones con el sector salud (véase la tabla 4). La mayoría de estas colaboraciones han sido con instituciones públicas de salud y los resultados de dichas colaboraciones corresponden a investigación básica y preclínica, sin llegar todavía a productos médicos terminados.

Tabla 4. Colaboraciones con instituciones de salud

Investigador	Institución	Resultados de la colaboración
E1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS)</li> <li>Sector Salud de Coahuila</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigación clínica en pacientes.</li> </ul>
E3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instituto Nacional de Neurocirugía</li> <li>Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) - Hospital 10 de Octubre</li> <li>Instituto Nacional de Investigación en Salud y Medicina de Francia (INSERM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Artículos científicos publicados en revistas internacionales con revisión por pares.</li> <li>Congresos nacionales e internacionales.</li> <li>Formación de recursos humanos.</li> </ul>
E6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hospital Ángeles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño de sistemas de liberación de fármacos a nivel laboratorio para el tratamiento del cáncer.</li> </ul>
E7	<ul style="list-style-type: none"> <li>ISSSTE - Centro Médico Nacional “20 de noviembre”</li> <li>Hospital Infantil de México</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluación biológica de nanosistemas de liberación de fármacos y su eficacia.</li> <li>Formación de recursos humanos.</li> </ul>
E8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sector Salud de Querétaro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Convenio para desarrollar un sistema basado en nanotecnología para diagnosticar cáncer de mama.</li> </ul>
E9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias (INER).</li> <li>Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán”</li> <li>Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investigaciones sobre el diagnóstico de diversas enfermedades.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

Otro desafío en este rubro son los altos costos de la investigación en modelos animales y en humanos. Así lo expresó uno de los entrevistados que trabaja en el

desarrollo de una terapia basada en nanomedicina para tratar la enfermedad de Parkinson:

E3: “Nosotros ya terminamos la investigación básica, entonces ahora, para llevarlo a la práctica hay que hacer estudios en simios con buenas prácticas de manufactura por una CRO [Contract Research Organization], una Organización de Investigación por Contrato, es decir, un tercero autorizado avalado por instituciones reglamentarias como la FDA [Food and Drug Administration], EMA [European Medicines Agency] y COFEPRIS [Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios]. Y eso es ya entrar a un club de millonarios, son gastos muy fuertes. Ahora, si se aprueba el estudio en monos, en simios, después viene la aplicación en fase 1 y así sucesivamente en la clínica. Y para eso ya estamos hablando, puedes imaginarte, de inversiones muy grandes”.

Los altos costos de la investigación preclínica y clínica que refiere E3 son un enorme desafío considerando la escasez de recursos económicos a la que se enfrenta la mayoría de los investigadores, por lo que sería conveniente fomentar vínculos con la industria farmacéutica para costear estas etapas de las investigaciones.

### Desafíos en la vinculación academia-industria

La vinculación de la academia con la industria es fundamental para que la investigación científica se materialice en productos tangibles para la sociedad. A este respecto, la mayoría de los investigadores entrevistados dijeron tener nula o muy poca vinculación con empresas. Las razones de esta desvinculación las explica así una de las investigadoras entrevistadas:

E8: “Desafortunadamente en la industria y la academia usamos lenguajes muy diferentes. Los tiempos de las empresas no son los mismos que manejamos nosotros. Aquí en la academia podemos llevarnos años en una investigación y a la empresa eso no le conviene, pero es que nosotros no contamos con toda la tecnología ni con todo el apoyo económico.

Entonces, sería muy bueno que pudiera existir este vínculo”.

De los 11 investigadores entrevistados, solo dos refieren tener vínculos con empresas. En la Tabla 5 se muestran detalles sobre estos vínculos.

Tabla 5. Colaboraciones con empresas

Investigador	Empresa	Descripción de la empresa	Resultados de la vinculación
E3	Nanoparticle Therapy Institute	Consortio entre un centro de investigación y una empresa para desarrollar terapias basadas en nanomedicina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Licenciamiento de una patente para su posible explotación comercial.</li> <li>Impulso de un tratamiento para la enfermedad de Parkinson.</li> </ul>
E7	CycloLab Ltd	Spin-off dedicada a la investigación y desarrollo de ciclodextrinas de grado farmacéutico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Convenios para la obtención de materia prima en investigaciones sobre nanosistemas de liberación de fármacos.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

Uno de los investigadores que participa en estas vinculaciones, y que además cuenta con una patente en licenciamiento en vías de explotarse comercialmente, comenta la importancia de patentar y hacer transferencia tecnológica con empresas:

E3: “Tenemos que arriesgarnos a patentar, y no solamente a patentar, sino a hacer todo el esfuerzo para que la patente se lleve a cabo a una empresa o a algún otro organismo o instituto que la fomente. En este caso de la nanomedicina, primero el conocimiento tiene que estar transferido a una empresa farmacéutica para que esto se lleve después a la clínica”.

El comentario de E3 remite al concepto de medicina traslacional, que se refiere a transformar los hallazgos de la investigación en aplicaciones clínicas, para lo cual el patentamiento y la vinculación academia-industria son factores primordiales (Seyhan, 2019).

## Desafíos de regulación

Los entrevistados señalaron que otro desafío es la falta de regulación en nanomedicina, indicando específicamente tres áreas de regulación: uso de nanopartículas en pacientes, comercialización de productos nanomédicos y disposición final de residuos (tabla 6).

Tabla 6. Falta de regulación y sus áreas

Área de regulación	Cita textual
Uso de nanopartículas en pacientes	E11: “Cómo podrían las personas o los médicos aceptar hacer un protocolo de investigación en nanopartículas si no hay nada en la regulación sanitaria que les diga que las nanopartículas son seguras o que pueden aplicarlas sin daño al paciente [...] la falta de regulación es algo importante”.
Comercialización de productos nanomédicos	E6: “En México no puede haber en el mercado productos que tengan nanopartículas o nanoestructuras para aplicaciones biomédicas porque no hay una regulación [...] Hay algunos productos que están en el mercado como por ejemplo, la plata coloidal y ese tipo de cosas, pero los venden como suplementos, o sea, no están como una nanotecnología aplicada al área biomédica”.
Disposición final de residuos	E8: “Aquí mismo en la dependencia se generan varias nanopartículas de todo tipo para diferentes aplicaciones, no nada más médicas, y la manera de desecharlas no está bien establecida, no tenemos un protocolo que se deba de seguir de manera precisa [...] Entonces ¿a dónde llegan todas esas nanopartículas? no lo sabemos. México debería de tener una regulación al respecto”.

Fuente: elaboración propia.

Las respuestas de los entrevistados apuntan a la necesidad de contar con un marco regulatorio para la nanomedicina, lo que es entendible debido a los posibles riesgos de toxicidad de los nanomateriales en el cuerpo humano y medio ambiente. Actualmente en México se tienen algunas normas voluntarias (NMX) sobre nanotecnología, pero no se cuenta con una regulación oficial al respecto (Ortiz *et al.*, 2022).

## Desafíos de política científica

En este rubro uno de los entrevistados menciona que, desde su punto de vista, la ciencia básica ha sido estigmatizada por no generar productos tangibles e inmediatos; no obstante, la ciencia básica es fundamental para generar el conocimiento del cual se desprenden las aplicaciones:

E5: “Me da la impresión que para el gobierno actual la ciencia básica está un poco estigmatizada. Se quiere que toda la ciencia, que todos los proyectos de investigación en ciencia lleven a un producto tangible y rápido, pero el dúo ciencia-tecnología no es así. Hay que generar conocimiento a través de la ciencia básica, mucho conocimiento, y una vez que se logre el conocimiento suficiente sobre algún tema ya entran la ciencia aplicada y los tecnólogos para tratar de transformar el conocimiento básico en conocimiento aplicado, ya instrumentado en algún aditamento o en un producto o un aparato. Entonces, no es una cuestión directa de que tú haces un proyecto de ciencia e inmediatamente vas a tener un resultado aplicado. No. Hay que generar mucho conocimiento y es algo que no comprenden las autoridades; quieren que a partir de los proyectos de investigación que involucren ciencia se llegue a aplicaciones inmediatas y eso no es posible”.

Con relación a lo expresado por E5, es conveniente recordar la división tradicional que se hace entre ciencia básica y aplicada. La ciencia básica tiene por objetivo obtener un mayor conocimiento o comprensión de los aspectos fundamentales de los fenómenos sin buscar aplicaciones comerciales inmediatas, mientras que la ciencia aplicada se enfoca en resolver problemas del mundo real (Malva, Kelchtermans, Leten, *et al.*, 2015).<sup>8</sup> Dado que el impacto de la ciencia básica no es visible en el corto plazo, algunos organismos financiadores limitan las inversiones en este rubro; sin embargo, el financiamiento a la ciencia básica es importante porque se obtienen diversos beneficios de ella: aumento del acervo de conocimientos útiles, formación de recursos humanos, desarrollo de nuevos instrumentos y metodologías científicas, acceso a redes de expertos a nivel nacional e internacional, aumento de la capacidad de resolución de problemas complejos e incidencia en la creación de empresas de base tecnológica (Salter y Martin, 2001).

<sup>8</sup> Esta distinción que proviene de los años cincuenta del siglo xx, ha perdido su validez con el tiempo, en la medida en que el desarrollo tecnológico y la presión ejercida por el mercado para recuperar las inversiones de capital ha reducido a muy poco tiempo la distancia entre la investigación y la puesta en el mercado de los productos.

## Desafíos del trabajo multidisciplinario

La nanomedicina es un campo altamente multidisciplinario. Esto se aprecia claramente en el perfil de los entrevistados (véase la tabla 3) cuya formación académica es diversa, comprendiendo disciplinas como la medicina, química, ingeniería, y ciencia de materiales. Una de las investigadoras entrevistadas percibe que esta

multidisciplinariedad trae consigo dificultades para trabajar y comunicarse con gente formada en distintas áreas:

E6: “El trabajo con biólogos, con químicos, con farmacólogos, es un grupo multidisciplinario [inaudible], cada quien tiene su lenguaje y a veces eso es una barrera [...] Por ejemplo, cuando yo he propuesto proyectos, los médicos [inaudible] te evalúan la parte biológica muy crítica y te dicen «eso no sirve de nada». Y luego vas con los ingenieros y ellos no entienden la parte biológica y también te dicen que eso no va a servir [inaudible]. Entonces es bastante complicada la situación porque estás en medio de disciplinas muy establecidas y no eres ni de una ni de otra, y pues se tiene esa barrera mental, esa barrera de conocimientos, y cuesta mucho pasarse de un lado de ingeniería a la biología [inaudible]”.

A este respecto, Battard (2012) analizó la multidisciplinariedad en la nanotecnología y sus hallazgos concuerdan con las apreciaciones de E6: en los laboratorios de nanotecnología convergen científicos procedentes de distintas disciplinas (física aplicada, ciencia de materiales, bioquímica, biología molecular, ingeniería, entre otras) lo que puede generar obstáculos en las investigaciones debido a los múltiples conocimientos, prácticas y formas de pensar de todos los involucrados.

## Propuestas para enfrentar los desafíos

Luego de preguntar sobre los desafíos, se consultó sobre ideas de propuestas para enfrentarlos. En varios casos los entrevistados no presentaron propuestas, pero algunas fueron recabadas (tabla 7).

Tabla 7. Propuestas para enfrentar los desafíos

Rubro	Desafío	Propuesta
Financiamiento	Escasez de recursos económicos para la investigación.	Aumentar el presupuesto para investigación y desarrollo. Priorizar el financiamiento a los proyectos de mayor calidad.
	Proyectos de investigación con poca incidencia en la sociedad.	Evaluar las propuestas de investigación con una visión social.
Beneficio social	Falta de directrices para elegir y priorizar líneas de investigación relevantes para el país.	Que una institución como el CONAHACYT o un comité de expertos en nanomedicina orienten y tomen decisiones sobre qué temas trabajar.
	Deficiencias en la formación de los investigadores.	Que los investigadores se actualicen y tomen cursos en las áreas donde tienen deficiencias.
Recursos humanos	Envejecimiento de los investigadores y pocas oportunidades para los jóvenes.	Apoyar la inserción laboral de jóvenes investigadores en las universidades y centros de investigación.
	Infraestructura limitada para realizar investigación.	Colaborar con otras instituciones que cuenten con la infraestructura necesaria.
Toxicología	Posibles riesgos de toxicidad de los nanomateriales en el cuerpo humano.	Trabajar con materiales aprobados por la FDA. Fortalecer el estudio de la nanotoxicología en el país.
	Poca vinculación con empresas.	Hacer ferias y reuniones entre academia, empresas y sector salud para crear vínculos.
Vinculación academia-industria	Falta de regulación de la nanomedicina.	Legislar el uso, comercialización y disposición final de los nanomateriales.

Fuente: elaboración propia.

A estas propuestas de los entrevistados habría que añadir otras recomendaciones que se reportan en la literatura, por ejemplo, elaborar una ley de nanoseguridad y guías en materia de nanociencia y nanotecnología con enfoque precautorio en la gestión de riesgos (Saldívar, 2022), replicar lo que hacen los países más avanzados en cuanto a regulación de nanomateriales (Ortiz *et al.*, 2022), crear programas educativos de licenciatura y posgrado en nanomedicina orientados a atender problemas del contexto mexicano (Hernández, 2019) y promover alianzas público-privadas en nanomedicina para investigar enfermedades desatendidas (Woodson, 2016).

## CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo fue mostrar los desafíos que enfrenta la investigación en nanomedicina en México. A través de entrevistas a expertos en el área se encontró que estos desafíos tienen que ver con financiamiento, beneficio social, recursos humanos, infraestructura, nanotoxicología, patentamiento, investigación preclínica y clínica, vinculación academia-industria, regulación, política científica y trabajo multidisciplinario.

La mayoría de los entrevistados coincidió en que el desafío más grande es la escasez de financiamiento para la investigación. La falta de recursos impacta no sólo en el avance de las investigaciones, sino también en otros rubros como la formación de recursos humanos, infraestructura, patentamiento, etc. Los entrevistados también señalaron que el financiamiento de sus investigaciones proviene mayoritariamente de recursos públicos y, dado que éstos son limitados, sería conveniente fomentar vínculos entre la academia y la industria para atraer financiamiento del sector privado a la investigación.

Además de la identificación de los desafíos, también se presentaron algunas propuestas para enfrentarlos, lo cual podría tener implicaciones prácticas. En este sentido, los hallazgos aquí reportados podrían servir de base para la formulación de políticas públicas encaminadas al fortalecimiento de la investigación nanomédica en México.

Finalmente, vale la pena resaltar la importancia que tiene la nanomedicina en México y la necesidad de apoyarla e impulsarla. Las entrevistas con investigadores mostraron que se está haciendo investigación nanomédica sobre cáncer, diabetes, enfermedad de Parkinson y tuberculosis, entre otros padecimientos, todos ellos presentes en la población mexicana. Si esas investigaciones pudieran derivar en tratamientos u otros productos nanomédicos, habría un beneficio para el país en términos de salud; sin embargo, para que esto ocurra, es necesario atender los desafíos discutidos en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo brindado a través del Proyecto Ciencia de Frontera No. 304320 y por la beca de estancia posdoctoral otorgada al primer autor (CVU 628139).

## REFERENCIAS

Agrawal, K. (2008). Doxorubicin. En S.J. Enna y D.B. Bylund (eds.), *xPharm: the comprehensive pharmacology reference* (pp. 1-5). Amsterdam: Elsevier. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780080552323/xpharm-the-comprehensive-pharmacology-reference>

- Allhoff, F. (2009). Risk, precaution, and emerging technologies. *Studies in Ethics, Law, and Technology*, 3(2). <https://doi.org/10.2202/1941-6008.1078>
- Archibald, M. M., Ambagtsheer, R. C., Casey, M. G., y Lawless, M. (2019). Using zoom videoconferencing for qualitative data collection: Perceptions and experiences of researchers and participants. *International Journal of Qualitative Methods*, 18,. <https://doi.org/10.1177/1609406919874596>
- Arentshorst, M. E., Buning, T.C., Boon, W. P. C., y Broerse, J. E. W. (2015). Prospecting responsible technology paths: Management options for an appropriate societal embedding of medical neuroimaging. *Science and Public Policy*, 42(6), 775-788. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv004>
- Aronson, J. K. (2016). Paclitaxel. En J. K. Aronson. *Meyler's side effects of drugs* (16 ed.) (pp. 445-452). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53717-1.01213-0>
- Battard, N. (2012). Convergence and multidisciplinary in nanotechnology: Laboratories as technological hubs. *Technovation*, 32(3-4), 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2011.09.001>
- Bracamonte-Arámburo, E. Y., y Foladori, G. (2022). Efectos adversos de mascarillas protectoras contra la COVID-19: casos conflictivos. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 30(85). <https://doi.org/10.33064/iycuaa2022853372>
- Chang, E. H., Harford, J. B., Eaton, M. A. W., Boisseau, P. M., Dube, A., Hayeshi, R., ... , Lee, D. S. (2015). Nanomedicine: Past, present and future – A global perspective. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 468(3), 511-517. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.10.136>
- Cozzens, S. (2012). Emerging technologies and inequalities: Beyond the technological transition. En R. A. Parker. *Can emerging technologies make a difference in development?* (pp. 1-11) Oxford: Routledge.
- DeJonckheere, M., y Vaughn, L. M. (2019). Semistructured interviewing in primary care research: A balance of relationship and rigour. *Family Medicine and Community Health*, 7(2). <https://doi.org/10.1136/fmch-2018-000057>

- Domingues, C., Santos, A., Alvarez-Lorenzo, C., Concheiro, A., Jarak, I., Veiga, F., ..., Figueiras, A. (2022). Where is nano today and where is it headed? A review of nanomedicine and the dilemma of nanotoxicology. *ACS Nano*, 16(7), 9994-10041. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c00128>
- Foladori, G. (2007). Nanotecnología, salud y pobreza. ¿Cuáles son las expectativas? En J. R. Coca. *Varia biológica: filosofía ciencia y tecnología* (pp. 43-63). León, España: Universidad de León, Centro de Estudios Metodológicos e Interdisciplinares.
- Foladori, G. (2022). Principio de precaución y análisis de riesgo regulatorio: dos fuerzas sociales encontradas y ejemplificadas en el caso de las nanotecnologías. *Trilogía: Ciencia Tecnología Sociedad*, 14(26). <https://doi.org/10.22430/21457778.2014>
- Foladori, G., y Invernizzi, N. (2021). AgNano, the construction of occupational health standards: A Status Update. En S. Kumar, P. Kumar y C.S. Pathak (eds.), *Silver micro-nanoparticles—properties, synthesis, characterization, and applications* (pp. 141-162). London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96104>
- Granados, P., y Joly, Y. (2015). Chapter 7—Intellectual property and innovation in translational medicine. En M. Wehling (ed.), *Principles of translational science in medicine (2nd ed.)* (pp. 281-297). London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800687-0.00030-X>
- Graur, F., Elisei, R., Szasz, A., Neagos, H. C., Muresan, A., Furcea, L., ..., Diudea, M. (2011). Ethical issues in nanomedicine. En S. Vlad y R. V. Ciupa (eds.), *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology* (pp. 9-12). Berlin: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22586-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22586-4_3)
- Gray, L., Wong-Wylie, G., Rempel, G., y Cook, K. (2020). Expanding qualitative research interviewing strategies: Zoom video communications. *Qualitative Report*, 25(5), 1292-1301. <https://doi.org/10.46743/2160-3715/2020.4212>
- Hemmerich, J., y Ecker, G. F. (2020). In silico toxicology: From structure–activity relationships towards deep learning and adverse outcome pathways. *WIREs Computational Molecular Science*, 10(4). <https://doi.org/10.1002/wcms.1475>
- Hernández, A. (2019). Nanomedicina: La nanomedicina tiene un alto potencial económico y podría reescribir completamente el mercado farmacéutico mundial. *Notas INCyTU* (32). <https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/index.php/notas/137-32-nanomedicina-2>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2023). Estadística de defunciones registradas de enero a junio de 2022 (preliminar) (*Comunicado de prensa núm. 29/23*). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf>
- Jackman, J. A., Cho, D.-J., Lee, J., Chen, J. M., Besenbacher, F., Bonnell, D. A., ..., Cho, N.-J. (2016). Nanotechnology education for the global world: Training the leaders of tomorrow. *ACS Nano*, 10(6), 5595-5599. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b03872>
- Kim, Y. (2022). The role of science in the policy subsystem: An application of the advocacy coalition framework to nanotechnology regulation policies. *International Journal of Public Administration*, 47(6), 397-414. <https://doi.org/10.1080/01900692.2022.2123504>
- Kim, Y., Corley, E. A., y Scheufele, D. A. (2017). Nanoscientists and political involvement: Which characteristics make scientists more likely to support engagement in political debates? *Science and Public Policy*, 44(3), 317-327. <https://doi.org/10.1093/scipol/scw065>
- Lama, S., Merlin-Zhang, O., y Yang, C. (2020). In vitro and in vivo models for evaluating the oral toxicity of nanomedicines. *Nanomaterials*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/nano10112177>
- Lame, G. (2019). Systematic literature reviews: An introduction. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1633-1642. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.169>
- Lammers, T., y Ferrari, M. (2020). The success of nanomedicine. *Nano Today*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.100853>
- Leist, M., Hasiwa, N., Daneshian, M., y Hartung, T. (2012). Validation and quality control of replacement alternatives – current status and future challenges. *Toxicology Research*, 1(1), 8-22. <https://doi.org/10.1039/c2tx20011b>
- Li, H., y Webster, T. J. (2023). Chapter 1—Trends in nano-

- medicine. En T. J. Webster (ed.), *Nanomedicine (2nd ed.)* (pp. 1-18). Sawston, Cambridge, UK: Woodhead. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818627-5.00020-8>
- Liu, Q., Zou, J., Chen, Z., He, W., y Wu, W. (2023). Current research trends of nanomedicines. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 13(11), 4391-4416. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2023.05.018>
- Lopezosa, C., Codina, L., y Freixa, P. (2022). *ATLAS.ti para entrevistas semiestructuradas: Guía de uso para un análisis cualitativo eficaz*. Barcelona: Universidad Pompeu Fabra. <http://repositori.upf.edu/handle/10230/52848>
- Lund, B. (2023). The questionnaire method in systems research: An overview of sample sizes, response rates and statistical approaches utilized in survey studies. *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*, 53(1), 1-10. <https://doi.org/10.1108/VJIKMS-08-2020-0156>
- Lysaght, T., y Kerridge, I. (2012). Rhetoric, power and legitimacy: A critical analysis of the public policy disputes surrounding stem cell research in Australia (2005–6). *Public Understanding of Science*, 21(2), 195-210. <https://doi.org/10.1177/0963662510368630>
- Maji, I., Mahajan, S., Sriram, A., Mehra, N. K., Srivastava, S., Madan, J., Singh, S. B., y Singh, P. K. (2022). Chapter 18 - Nanotoxicology: Toxicity and safety issues of nanoparticles. En N. K. Mehra, S. Srivastava, J. Madan, y P. kumar (eds.), *Multifunctional nanocarriers* (pp. 461-474). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85041-4.00017-2>
- Malva, A. D., Kelchtermans, S., Leten, B. y Veugelers, R. (2015). Basic science as a prescription for breakthrough inventions in the pharmaceutical industry. *The Journal of Technology Transfer*, 40, pp. 670–695. <https://doi.org/10.1007/s10961-014-9362-y>
- Martins, J. P., Neves, J., de la Fuente, M., Celia, C., Florindo, H., Günday-Türeli, N., ..., Santos, H. A. (2020). The solid progress of nanomedicine. *Drug Delivery and Translational Research*, 10, 726-729. <https://doi.org/10.1007/s13346-020-00743-2>
- Merck, A. W., Grieger, K. D., y Kuzma, J. (2022). How can we promote the responsible innovation of nano-agrifood research? *Environmental Science & Policy*, 137, 185-190. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.08.027>
- Millán-Chiu, B. E., Rodríguez-Torres, M. P., y Loske, A. M. (2020). Nanotoxicology in plants. En J. K. Patra, L. F. Fraceto, G. Das, y E. V. R. Campos (eds.), *Green nanoparticles: Synthesis and biomedical applications* (pp. 43–76). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39246-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39246-8_3)
- Oliffe, J. L., Kelly, M. T., Gonzalez, G., y Yu, W. F. (2021). Zoom interviews: Benefits and concessions. *International Journal of Qualitative Methods*, 20. <https://doi.org/10.1177/16094069211053522>
- Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD] (2015). Scientific advice for policy making: The role and responsibility of expert bodies and individual scientists. *Science, Technology and Industry Policy Papers*. Paris: OECD. <https://doi.org/10.1787/5js3311jcpwb-en>
- Ortiz, Á., Foladori, G., y Bracamonte, E. (2022). Elementos críticos sobre las nanotecnologías en México. *Espacio I+D, Innovación más desarrollo*, 11(31), <https://doi.org/10.31644/IMASD.31.2022.a04>
- Quezada-Ramírez, M. A., y Chin-Chan, M. (2021). Poor investment and limited research positions in biomedical research: Challenges for young researchers in Mexico. *Health Policy and Technology*, 10(2). <https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2021.100509>
- Rotolo, D., Hicks, D., y Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology? *Research Policy*, 44(10), 1827-1843. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006>
- Røttingen, J.-A., Regmi, S., Eide, M., Young, A. J., Viergever, R. F., Årdal, C., ..., Terry, R. F. (2013). Mapping of available health research and development data: What's there, what's missing, and what role is there for a global observatory? *The Lancet*, 382(9900), 1286-1307. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61046-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61046-6)
- Saldívar, L. (2022). Recomendaciones de política pública de nanociencia y nanotecnología en México: Privilegiar el bienestar humano y ambiental. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15(28), 1e-23e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69655>

- Salter, A. J., y Martin, B. R. (2001). The economic benefits of publicly funded basic research: A critical review. *Research Policy*, 30(3), 509-532. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00091-3)
- Sayes, C. M., y Child, J. R. (2015). Chapter 1.4 - Nanotoxicology: Determining nano-bio interactions and evaluating toxicity using in vitro models. En P. I. Dolez (ed.). *Nanoengineering* (pp. 85-110). Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62747-6.00004-X>
- Seyhan, A. A. (2019). Lost in translation: The valley of death across preclinical and clinical divide – identification of problems and overcoming obstacles. *Translational Medicine Communications*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s41231-019-0050-7>
- Soto Vázquez, R. (2023a). *Análisis de la investigación y desarrollo de la nanomedicina en México* (Tesis doctoral). Recuperado de: [https://relans.org/wp-content/uploads/Tesis\\_Final\\_RobertoSoto.pdf](https://relans.org/wp-content/uploads/Tesis_Final_RobertoSoto.pdf)
- Soto Vázquez, R. (2023b). La nanomedicina en México: un análisis de las actividades de investigación y desarrollo. *Avance y Perspectiva*, 9(1). <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/la-nanomedicina-en-mexico-un-analisis-de-las-actividades-de-investigacion-y-desarrollo/>
- Soto Vázquez, R., y Foladori, G. (2023). La nanomedicina en México desde el punto de vista de los investigadores. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 27(80), 55-58. [https://www.utm.mx/edi\\_anteriores/temas80/T80\\_N01\\_nanomedicina\\_mexico.pdf](https://www.utm.mx/edi_anteriores/temas80/T80_N01_nanomedicina_mexico.pdf)
- Soto Vázquez, R., Záyago, E., y Maldonado, L. A. (2022). Nanomedicina para enfrentar la pandemia de COVID-19: un análisis bibliométrico de las publicaciones de Web of Science con la herramienta Bibliometrix de R. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 33. <https://acimed.sld.cu/index.php/acimed/article/view/1880>
- Su, L. Y.-F., Cacciatore, M. A., Brossard, D., Corley, E. A., Scheufele, D. A., y Xenos, M. A. (2016). Attitudinal gaps: How experts and lay audiences form policy attitudes toward controversial science. *Science and Public Policy*, 43(2), 196-206. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv031>
- Subsecretaría de Educación Superior. (s/f). *Instituciones de Educación Superior*. Recuperado de: <https://educacionsuperior.sep.gob.mx/instituciones.html>
- Vega-González, L. R., y Hernández-Jardines, I. J. (2018). The costs of patenting in Mexico. *Revista Médica Del Hospital General de México*, 81(3), 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.hgmx.2017.05.004>
- von Ranke, N. L., Geraldo, R. B., Lima, A., Evangelho, V. G. O., Flammini, F., Cabral, L. M., Castro, H. C., ..., Rodrigues, C. R. (2022). Applying in silico approaches to nanotoxicology: Current status and future potential. *Computational Toxicology*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2022.100225>
- Von Schomberg, R. (2011). Prospects for technology assessment in a framework of responsible research and innovation. En: M. Dusseldorp and R. Beecroft (eds). *Technikfolgen abschätzen lehren: Bildungspotenziale transdisziplinärer Methoden*. Wiesbaden: Vs Verlag. (p.p. 1-19). Europa: Available at SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2439112>
- Woodson, T. S. (2016). Public private partnerships and emerging technologies: A look at nanomedicine for diseases of poverty. *Research Policy*, 45(7), 1410-1418. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.04.005>
- Wright, D., Finn, R., Gellert, R., Gutwirth, S., Schütz, P., Friedew, M., ..., Mordini, E. (2014). Ethical dilemma scenarios and emerging technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 87, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.008>
- Wu, L.-P., Wang, D., y Li, Z. (2020). Grand challenges in nanomedicine. *Materials Science and Engineering: C*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110302>
- Yang, C., y Merlin, D. (2023). Challenges to safe nanomedicine treatment. *Nanomaterials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/nano13071171>
- Younis, M. A., Tawfeek, H. M., Abdellatif, A. A. H., Abdel-Aleem, J. A., y Harashima, H. (2022). Clinical translation of nanomedicines: Challenges, opportunities, and keys. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114083>
- Youtie, J., Porter, A. L., y Ying, H. (2017). Early social science research about Big Data. *Science and Public Policy*, 44(1), 65-74. <https://doi.org/10.1093/scipol/scw021>
- Zhang, C., Yan, L., Wang, X., Zhu, S., Chen, C., Gu, Z., y

Zhao, Y. (2020). Progress, challenges, and future of nanomedicine. *Nano Today*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101008>

Zhang, S. (2020, agosto 31). *America is running low on a crucial resource for COVID-19 vaccines: The country is facing a monkey shortage*. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2020/08/america-facing-monkey-shortage/615799/>

## NOTAS DE AUTOR

<sup>a</sup> Doctor en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav). Investigador posdoctoral CONAHCYT adscrito a la Unidad Académica en Estudios del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Línea de investigación: nanotecnología y sociedad. Autor de correspondencia.

Correo electrónico: roberto.soto@cinvestav.mx.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1956-7045>.

## Últimas publicaciones

Soto Vázquez, R., y Foladori, G. (2023). La nanomedicina en México desde el punto de vista de los investigadores. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 27(80), 55–58. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/la-nanomedicina-en-mexico-un-analisis-de-las-actividades-de-investigacion-y-desarrollo/>

Soto Vázquez, R., Záyago, E., y Maldonado, L. A. (2022). Gobernanza de la nanomedicina: una revisión sistemática. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15(28) 1e-25e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69682>

Soto Vázquez, R., Záyago Lau, E., y Maldonado López, L. A. (2022). Nanomedicina para enfrentar la pandemia de COVID-19: un análisis bibliométrico de las publicaciones de Web of Science con la herramienta Bibliometrix de R. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 33. <https://acimed.sld.cu/index.php/acimed/article/view/1880>

<sup>b</sup> Doctor en Economía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor investigador de la Unidad Académica en Estudios del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Líneas de investigación: capital global y estudios geoestratégicos; ciencia, tecnología y desarrollo; capital, ambiente y desarrollo. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel III).

Correo electrónico: gfoladori@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7441-3233>

## Últimas publicaciones

Foladori, G., y Bracamonte, E. (2023). Los programas de medicina de precisión y los desafíos para la gestión de la salud pública. *Estudios Regionales en Economía, Población y Desarrollo: Cuadernos de Trabajo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*, 13(77), 3-27. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9064986.pdf>

Arteaga, E., Ortiz-Espinoza, Á., y Foladori, G. (2023). Empresas nanotecnológicas en México: Frente a la necesidad de un inventario nacional. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 23(44). <http://coltlax.edu.mx/openj/index.php/ReyDS/article/view/298/pdf>

Foladori, G. (2022). Agricultura de precisión y su carácter capitalista: La no neutralidad de la tecnología. *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 14(28). <https://doi.org/10.22430/21457778.2339>

<sup>c</sup> Doctor en Estudios del Desarrollo por la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Profesor investigador y director de la Unidad Académica en Estudios del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Líneas de investigación: ciencia, tecnología y desarrollo; capital global y estudios geoestratégicos. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel II).

Correo electrónico: zayagolau@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3670-8356>

## Últimas publicaciones

San Martín, J. R., y Záyago, E. (2023). Capacidades gubernamentales en el diseño de políticas científicas. Análisis comparativo con redes semánticas entre personal chino y mexicano. *Ciencia*

*Ergo-Sum*, 30(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v30n1a3>

Ortiz, Á., Foladori, G., y Záyago, E. (2022). Financiamiento público para nanotecnologías: El caso de Fomix y Fordecyt. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 15(33), 149–168. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9200572.pdf>

Záyago, E., León, S., y Soto Vázquez, R. (2021). Nanotechnology and Covid: Technical Solutions in the Hunt for Inequality. En M. M. Erdoğan, E. Mustafa, E. Alaverdov, A. García y K. Tryma (eds.). *Impacts of COVID-19 on Societies and Economies* (pp. 233-249). London: IJOPEC.