

Nanogobernanza y regulación de las NyN Miradas desde América Latina



- Recomendaciones de política pública para el bienestar humano y ambiental
- Evaluación de riesgos de la nanomedicina
- Mecanismos y lineamientos legales para emprendedores, autorregulación y empresas ciudadanas
- Capacitación de la fuerza de trabajo y relevancia de la educación en NyN

Estructuras nanométricas: alúminas anódicas porosas

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Enrique Graue Wiechers
Rector
Leonardo Lomelí Venegas
Secretario General

Guadalupe Valencia García
Coordinadora de Humanidades
William Henry Lee Alardín
Coordinador de la Investigación Científica
Jorge Vázquez Ramos
Coordinador de Vinculación y Transferencia
Tecnológica

Rodolfo Zanella Specia
Director ICAT
Mauricio Sánchez Menchero
Director CEIICH
Fernando Rojas Iñiguez
Director CNYN

Mundo Nano • <http://www.mundonano.unam.mx>

Editor en jefe

Rodolfo Zanella Specia • <https://orcid.org/0000-0002-2118-5898> • rodolfo.zanella@icat.unam.mx

Editores

Gian Carlo Delgado Ramos • <https://orcid.org/0000-0001-6851-9309> • giancarlo@unam.mx

Leonel Cota Araiza • leonel@cny.n.unam.mx

Editor asociado

Mario Rogelio López Torres • mrlt@unam.mx

Editoras invitadas

Laura Saldívar Tanaka • lsaldivar@colmex.mx / Mónica Anzaldo Montoya • monicaanzaldo@gmail.com

COMITÉ CIENTÍFICO

María Elena Álvarez-Buyllá
<https://orcid.org/0000-0002-7938-6473>
• eabuylla@gmail.com
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Rodolfo Omar Arellano Aguilar
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Simone Arnaldi
• simonearnaldi@gmail.com
Universidad de Padova. Italia

Sergio Fuentes Moyado
• fuentes@cny.n.unam.mx
<https://orcid.org/0000-0002-9843-408X>
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Jesús González Hernández
• jesus.gonzalez@cidesi.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-6906-5465>
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,
México

Emmanuel Haro Poniatowski
• haro@xanum.uam.mx
Universidad Autónoma Metropolitana. México

Isaac Hernández Calderón
<https://orcid.org/0000-0002-7606-4807>
• Isaac.Hernandez@fis.cinvestav.mx
Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados. México

Catherine Louis
Sorbonne Université, UPMC Univ Paris 06.
Francia

Eugenio R. Méndez Méndez
<https://orcid.org/0000-0002-7042-8622>
• emendez@cicese.mx
Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada. México

Luis Mochán Backal
<https://orcid.org/0000-0003-0418-5375>
• mochan@em.fis.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

José Saniger Blesa
<https://orcid.org/0000-0001-8024-2541>
• jose.saniger@ccadet.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

José Saniger Blesa
<https://orcid.org/0000-0001-8024-2541>
• jose.saniger@ccadet.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Pedro Serena Domingo
Consejo Superior de Investigaciones
Científicas. España

Roger Strand
<https://orcid.org/0000-0001-6159-1586>
• roger.strand@svt.uib.no
Universidad de Bergen. Noruega

Julia Tagüeña Parga
• jtp@ier.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Sergio Ulloa
<https://orcid.org/0000-0002-3091-4984>
• ulloa@ohio.edu
Universidad de Ohio. Estados Unidos

Fern Wickson
<https://orcid.org/0000-0002-2841-4155>
Genk Center for Biosafety. Noruega

Miguel José Yacamán
<https://orcid.org/0000-0001-5124-7116>
• miguel.yacaman@utsa.edu
Universidad de Texas en Austin. Estados
Unidos

COMITÉ EDITORIAL

Norma Blazquez Graf
• blazquez@unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Ricardo Castaño
Universidad Distrital Fransisco José de
Caldas, Colombia

Gabriela Alicia Díaz Guerrero
<https://orcid.org/0000-0003-2160-2732>
• diaz@fisica.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Roberto Escudero Derat
• escu@unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Ruben J. Lazos Martínez
• rlazos@cenam.mx
Centro Nacional de Metrología. México

Louis Lemkow
• Louis.Lemkow@uab.es
Universidad Autónoma de Barcelona.
España

Sofía Liberman Shkolnikoff
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Paulo Martins
• marpaulo@ipt.br
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do
Estado de São Paulo. Brasil

Aquiles Negrete Yankelevich
• aqny@unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Gerko Oskam
Instituto Politécnico Nacional. México

Fernando Rojas Iñiguez
• frojas@cny.n.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Noboru Takeuchi Tan
• takeuchi@cny.n.unam.mx
Universidad Nacional Autónoma de México.
México

Joaquín Tutor Sánchez
Universidad Pontificia Comillas. España

Isauro Uribe Pineda • isauribe@unam.mx
Editor técnico

Concepción Alida Casale Núñez
Cuidada de la edición



Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, Vol. 15, Núm. 28, enero-junio 2022, es una publicación semestral, en versión electrónica, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México, a través del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNYN) y el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (CEIICH), Torre II de Humanidades 4º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México. <http://www.mundonano.unam.mx>, mundonanounam@gmail.com. Editores responsables: Gian Carlo Delgado Ramos

y Mario Rogelio López Torres. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo Núm. 04-2015-062512122500-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho del Autor, ISSN 2448-5691. Responsable de la última actualización de este número: Isauro Uribe Pineda, CEIICH-UNAM. Fecha de la última actualización: 17 de diciembre de 2021.

Servicios que indexan a Mundo Nano: Latindex, Periódica, Biblat, DOAJ, REDIB, Conacyt, SciELO-México.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores. Prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización por escrito de los editores responsables.



Atribución-NoComercial (CC BY-NC)
4.0 Internacional

CONTENIDO / CONTENTS

Vol. 15, Núm. 28, enero-junio 2022

doi: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28>

Nanogobernanza y regulación de las NyN. Miradas desde América Latina

Laura Saldívar Tanaka y Mónica Anzaldo Montoya, editoras invitadas

1e-12e **PRESENTACIÓN / PRESENTATION**

Mónica Anzaldo Montoya, Laura Saldívar Tanaka
Editoras invitadas

1e-2e **EDITORIAL / EDITORIAL**

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLES

1e-23e **Recomendaciones de política pública de nanociencia y nanotecnología en México: privilegiar el bienestar humano y ambiental**
Laura Saldívar Tanaka

1e-25e **Nanotecnología en la periferia: los casos de Costa Rica, Uruguay y Venezuela**
Adriana Chiancone, María Sonsiré López, José Roberto Vega Baudrit

1e-22e **Governança, nanotecnologia e a necessidade de capacitação da força de trabalho**
Arline Sydneia Abel Arcuri, Jorge Marques Pontes, Jose Renato Alves Schmidt, Luís Renato Balbão Andrade, Maria de Fátima Torres Faria Viegas, Valéria Ramos Soares Pinto, Antonio Gracias Vieira Filho

1e-26e **Nano-governance, nano-regulación y, ¿nano-ciudadanía? Un análisis de escenarios normativos en Brasil y Argentina**
Mauricio Berger, Airton Guilherme Berger Filho

1e-17e **Sandbox regulatorio como fuente de derecho en caso de la disrupción nanotecnológica brasileña**
Daniela Pellin, Wilson Engelmann

1e-23e **Autorregulación y empresas ciudadanas: cartilla de lineamientos legales para emprendedores que trabajan con nanotecnología**
Fernanda Felitti da Silva D'ávila, Raquel von Hohendorff, Wilson Engellman, Daniele Weber S. Leal

1e-24e **Nanoquímica, un campo de conocimientos de alto valor educativo y disciplinar**
Jorge Meinguer Ledesma

ARTÍCULOS DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLES

- 1e-25e **Gobernanza de la nanomedicina: una revisión sistemática**
Roberto Soto-Vazquez, Edgar Záyago Lau, Luis Alfonso Maldonado López

SECCIÓN ESPECIAL — NANOMATERIALES

- 1e-28e **Alúmina anódica porosa (AAP): arreglo de nanocrioles de α -alúmina de tamaño modulable**
Ricardo González Campuzano, María Esther Mata Zamora

- 1e-6e **POLÍTICA EDITORIAL**

Diseño de portada: Martha Laura Martínez Cuevas
Imágenes de Adobe Stock.

Correspondencia: Revista *Mundo Nano*,
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades,
Torre II de Humanidades 5º piso, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria,
Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.
Correo-e: mundonano@unam.mx



Presentación

Presentation

Las nanotecnologías (NT) han logrado importantes contribuciones en los diferentes sectores en los que se aplican, principalmente en lo relacionado con el sector salud, las tecnologías de la información y la comunicación y los nuevos materiales. Un ejemplo relevante es la respuesta ante la actual crisis socio-sanitaria ocasionada por la pandemia de la enfermedad COVID-19, en donde los conocimientos, que por décadas se han generado alrededor de ellas, están siendo utilizados en el desarrollo de algunas de las vacunas que han dado protección a millones de personas en el mundo.¹ Si bien estos hechos muestran el enorme potencial que tienen las NT para aportar en la solución de problemas de enorme complejidad científica —como es la emergencia de un virus nuevo y peligroso—, también dejan de manifiesto que la solución técnica no resuelve todo el problema.

Por otra parte, es ampliamente aceptado que las NT plantean incertidumbres y riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Además de las consecuencias sociales que se esperan cuando estas se integren con amplitud en los procesos de producción industrial en los diferentes sectores. Dadas las potenciales afectaciones para las personas (trabajadores involucrados en la fabricación de NM, personal de investigación, consumidores, agricultores, etcétera), para el ambiente, y las incertidumbres de su alcance, surge la necesidad de analizar su gobernanza. El análisis de la gobernanza involucra examinar el sentido o racionalidad que guía la toma de decisiones, a lo que corresponde conocer los actores que participan, los intereses y valores que se disputan, la manera en que se motiva la democratización de las decisiones, la identificación de los temas que se manejan como de interés público y cuáles resultan marginalizados, así como la rendición de cuentas sobre este proceso.

Gobernanza

La literatura especializada en tecnologías emergentes destaca al menos tres enfoques para el análisis de la gobernanza: descriptivo, normativo y anticipatorio.

El enfoque descriptivo entiende la gobernanza como un proceso colectivo de toma de decisiones, que se lleva a cabo con la finalidad de encauzarlo o dirigir el sentido de la trayectoria de la tecnología. Parte de la premisa de que la

¹ Véase, por ejemplo: Las nanociencias y la nanotecnología ante la COVID 19, *Mundo Nano*, 14(27), 2021.

gobernanza es un espacio de debate y confrontación entre actores que representan múltiples intereses y racionalidades. Como lo ha señalado Chauvet (2009), la gobernanza es una arena de disputa por el poder que no se restringe a la esfera pública, sino que es un terreno en el que se dirimen los intereses y demandas de los actores privados quienes presionan para influir en la toma de decisiones (Chauvet, 2009). En este terreno del conflicto, es posible que el balance de intereses se oriente hacia fines de interés colectivo, pero también en torno a intereses sectoriales, de grupo o cupulares, lo cual nos lleva a entender que el hecho de que existan procesos de gobernanza no significa que se encuentren representados los intereses más significativos de la sociedad.

Hagendijk e Irwin (2006) identificaron una tipología de modos de gobernanza científica, la cual resulta útil si nos interesa abordar el sentido descriptivo de la gobernanza. Este recurso analítico fue creado tras analizar la gobernanza de diferentes tecnologías en países europeos (biotecnología y silvicultura en Finlandia, desechos nucleares en Suecia, organismos genéticamente modificados en alimentos en Holanda y Reino Unido). Los autores proponen seis tipos ideales de gobernanza: discrecional, corporativista, educativa, mercado, agonística o de confrontación, y deliberativa. El análisis consiste en extraer los rasgos esenciales de la gobernanza como pueden ser, el número y tipo de actores que participan, la confianza en el papel de los expertos en la sociedad, las trayectorias de dependencia (*path dependence*) en el manejo de la política de ciencia, tecnología e innovación (CTI), los valores y aspectos culturales que se ponen en disputa, y las capacidades burocráticas para activar espacios de participación efectiva de los actores (Hagendijk e Irwin, 2006). Lo interesante de la tipología es que brinda un espectro de modos de gobernar tecnologías que van de los menos incluyentes y jerárquicos a formas más abiertas y deliberativas (Anzaldo, 2019: 230).

Otro enfoque para el análisis de la gobernanza en su sentido descriptivo, similar al de los anteriores autores, es la propuesta por Laurens Landerweerd y colegas de las universidades de Nimega y de Maastricht, en los Países Bajos. Los autores identifican tres estilos de gobernanza: tecnocrática, de ética aplicada y de participación pública (Landeweerd *et al.*, 2015).

El enfoque normativo o prescriptivo implica, de manera general, evaluar la forma en que se toman las decisiones sobre tecnologías controversiales guiadas por una serie de principios que permiten discutir la legitimidad y la *calidad de la democracia* en la toma de decisiones. Entendemos la calidad de la democracia como la condición real de gobierno para el pueblo (Monedero, 2009: 157). La vertiente normativa inició en Europa a partir del concepto buena gobernanza introducido en el *Libro blanco de la gobernanza europea*, publicado en el año 2001 (Comisión Europea, 2001). La construcción del concepto de buena gobernanza en el ámbito de la ciencia es el resultado de una serie de cuestionamientos a las instituciones de seguridad social europeas, las cuales se vieron profundamente vulneradas ante el descubrimiento de un manejo poco ético de los sistemas agroalimentarios por parte de las empresas agroindustriales y los gobiernos, especialmente en lo que respecta a los impactos derivados de la emergencia y pro-

pagación de la enfermedad encefalopatía espongiforme bovina (EEB), causada por carne contaminada, llamada crisis de las “vacas locas” en 1996.

Es común en estos enfoques examinar la gobernanza de la tecnología a partir de la presencia de principios como la apertura, participación, rendición de cuentas, eficacia y coherencia (Comisión Europea, 2001), así como la transparencia, la integridad y la capacidad (Trump, 2017). El análisis de estos criterios es útil para identificar los déficits de principios éticos que prevalecen en el manejo de la I+D de las NT, por ejemplo, en saber cómo se asignan las prioridades de investigación, quiénes establecen los temas, cómo lidian los gobiernos y los actores que estos convocan con los riesgos y la incertidumbre, qué pasa con los trabajadores que manipulan nanomateriales, ¿se les ha informado de los riesgos? Los principios de buena gobernanza han sido analizados en el caso de las nanotecnologías en el contexto europeo (Forsberg, 2012) y también para el caso mexicano (Anzaldo y Chauvet, 2016).

En la vertiente del sentido normativo es conveniente incluir la responsabilidad social empresarial como un concepto para analizar procesos decisorios relacionados con las NT y otras tecnologías. La responsabilidad social es el marco que pretende adoptar el sector privado para mostrar que asumen un interés más allá del beneficio económico que deben a sus accionistas, y dar a entender su compromiso por la sustentabilidad, los derechos humanos, buenas prácticas laborales, derechos de los consumidores, entre otros (Duque *et al.* 2013).

El tercer enfoque en el estudio de la gobernanza de tecnologías emergentes es el anticipatorio. A partir de este planteamiento se pretenden generar prácticas de gobernanza que influyan, moldeen e intervengan en la trayectoria de la tecnología en la etapa más temprana posible, y bajo la idea de que es viable construir mejores tecnologías. Esto es, tecnologías desde las cuales se habilite la construcción de futuros más sostenibles y que impulsen o por lo menos no contradigan el avance de acciones que promuevan la justicia social y garanticen los derechos humanos. Los trabajos que destacan en este enfoque son: evaluación de tecnologías en tiempo real (*real-time technology assessment*) (Guston y Sarewitz, 2002; Sarewitz, 2011), evaluación constructiva de tecnologías (*constructive technology assessment*) (Rip y te Kulve, 2008), gobernanza anticipatoria o *upstream* (Barben *et al.*, 2008), así como los que se circunscriben en la investigación e innovación responsable – RRI (*responsible research and innovation*) (Guston *et al.*, 2014; Stilgoe *et al.* 2013; Zwart *et al.*, 2014; Stilgoe y Guston, 2017; Owen *et al.*, 2020).² De manera más reciente, se suma también el modelo de política para la innovación transformadora llevado a cabo por *transformative innovation policy* (TIP) desarrollada en la Unidad de Investigación de Política Científica de la Universidad de Sussex, Reino Unido (Boni *et al.*, 2019).

Debemos mencionar que, tanto la RRI como la TIP son modelos que se están utilizando en las más altas esferas de la toma de decisiones sobre política

² Véase, para este tema, la revista *Responsible Innovation*, creada en 2014.

de CTI y gobernanza científica de países europeos e incluso de América Latina. Tal es el caso del concepto innovación responsable, base del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (Stilgoe y Guston, 2017: 855). La National Nanotechnology Initiative de Estados Unidos de América también integra el concepto RRI, mientras que el modelo de los ingleses TIP, se está implementando por los gobiernos de China, Colombia, Ghana, Kenia, Noruega, entre otros.³

Las distintas propuestas de gobernanza aquí agrupadas parten de las siguientes premisas: en primer lugar, se reconoce que las incertidumbres, riesgos e interpelaciones a los valores que provienen de las tecnologías emergentes son consecuencia de la decisión y de las racionalidades mercantil, eficientista y productivista a las que están, por decirlo de alguna manera, encadenadas. Tal como nos lo ha mostrado la sociología del riesgo desde hace varias décadas, y que hoy adquiere vigencia, los procesos científicos y tecnológicos surgidos en la modernidad generan riesgos de origen antropogénico cuyas características principales son: no contenerse geográfica ni temporalmente; no percibirse fácilmente, pues requieren de la ciencia para ser identificados; los efectos son inquantificables (Beck, 1998).

En segundo lugar, si las consecuencias de las tecnologías provienen de la toma de decisiones, entonces no son herramientas autónomas y neutras, sino sistemas que pueden ser moldeados y conducidos de formas distintas. Diego Parente (2010) señala que los medios y los fines se encuentran conectados de tal forma que favorecen unos fines y obstruyen otros:

[...] toda tecnología corporiza y expresa elecciones de valor políticas, apareciendo como un producto social contingente abierto a una pluralidad de diseños alternativos. El proceso por el cual una serie de diseños resulta favorecida está influenciado por las estructuras y fuerzas sociales predominantes, incluyendo el propio orden tecnológico preexistente. Este proceso también refleja elecciones sociales tácitas o explícitas, incluyendo negociaciones o luchas políticas. (Parente, 2010:102).

En tercer lugar, los enfoques anticipatorios comparten la premisa de que ciencia, tecnología y cultura se *co-producen*. El concepto de co-producción es compartido en el campo de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología (ESCyT) para indicar “la manera en que la ciencia y el orden social se constituyen mutuamente” (Jasanoff, 2004: 2). El lenguaje de la coproducción, permite discutir diversas relaciones entre conocimiento, naturaleza, cultura y orden social (Jasanoff, 2004).

Esta idea es fundamental para la gobernanza de tecnologías emergentes, al permitir apartarse del modelo dualista que divide ciencia y sociedad o tecnología y sociedad, para comprender, por una parte, que los procesos científicos y tecnológicos no están fuera de la sociedad, es decir, el diseño, desarrollo e im-

³ <https://www.tipconsortium.net/>

plantación de la ciencia y tecnología están sujetos a contextos, tradiciones, identidades, historia y relaciones de poder, de donde emerge cierto tipo de tecnología con cierto tipo de resultados. Por la otra, nos brinda la precisión de que la forma en que producimos conocimiento y tecnología se incorpora en las prácticas, en las instituciones sociales, en leyes, esto es, reconfigura y *ordena* el devenir de las sociedades.

En este sentido y para evitar un desarrollo sin control gubernamental ni aceptación social, se ha recomendado realizar una revisión profunda y crítica de las implicaciones éticas, legales, sociales y ambientales de las NT (nanoELSA), además de crear sistemas de participación ciudadana y democrática para la toma de decisiones sobre los objetivos, prioridades de financiamiento, límites de la investigación, desarrollo y aplicación de las NT; así como para evaluar y supervisar sus impactos socioambientales (Saldívar, 2019).

Así, a partir del 2005, principalmente en Europa, se financian proyectos sobre las implicaciones éticas de las NT. Algunos bajo el auspicio del Directorado General de Investigación de la Comunidad Europea, como son los consorcios: Nano-biotechnology: Responsible Action on Issues in Society and Ethics (NanoBio-RAISE, 2005), Nanotechnology Capacity Building NGOs (NanoCap 2006-2009), y Deepening Ethical Engagement and Participation in Emerging Nanotechnologies (DEEPEN, 2006).⁴ También emanan propuestas desde la academia, como los Principios de Creta, sobre acceso a las nanotecnologías para la salud humana (Poletti *et al.* 2011). Más adelante, en 2009, el Parlamento Europeo (EP, 2009) recomendó el desarrollo de directrices éticas estrictas, en particular para la nanomedicina, así como elaborar más estudios sobre el tema. El mismo año, la Comisión Europea dio su recomendación sobre un código de conducta para las NC y NT responsables (EC, 2009) el cual es un instrumento voluntario para que los Estados miembros lleven a cabo nuevas iniciativas para garantizar la investigación segura, ética y sostenible de las NC y NT en la UE (Kjølberg y Strand, 2011).

Finalmente, como cuarta premisa, los trabajos sobre gobernanza anticipatoria se han venido nutriendo de los estudios de expectativas, visiones e imaginarios en la tecnociencia (Konrad *et al.* 2017). Apoyados en las investigaciones sobre el desempeño de las expectativas y metodologías para construir escenarios de futuro, los académicos que siguen esta tendencia ven posible influir la gobernanza de la tecnología a través de ejercicios colectivos que estimulen la generación de expectativas sobre la tecnología y luego utilizarlos como un recuso para modular su dirección.

En Europa, desde 2010, el Directorado General para Investigación, Tecnología y Desarrollo (DG-RTD), con financiamiento del programa marco 7mo (7th Framework Programme) y el Horizon 2020, se creó la iniciativa NanoSafety Cluster (NSC), que apoya grandes proyectos colaborativos de investiga-

⁴ DEEPEN <http://www.geography.dur.ac.uk/projects/deepen>

ción, sobre la seguridad de los nanomateriales y la nanotecnología, entre centros de investigación, gobierno, empresas y también, más recientemente, entre organizaciones de la sociedad civil, sobre la seguridad de los nanomateriales.⁵ Una mirada rápida a los integrantes de estas colaboraciones, nos habla de una diversidad de actores, si bien principalmente de centros de investigación, tanto de universidades como de institutos nacionales, o del sector industrial, también se observa participación de organizaciones representantes de los trabajadores, el ambiente o los consumidores.⁶

En América Latina, también se han desarrollado propuestas para la gobernanza de tecnologías y, aunque no se centran en las NT, se les considera aquí porque comparten las premisas que acabamos de describir e incluso ofrecer recursos analíticos más apegados a la realidad de la región, como es la enorme desigualdad. En este contexto, la tendencia actual de los enfoques de la región radica en la preocupación por construir procesos científicos y tecnológicos que aborden la inclusión social, la desigualdad, el ambiente y la territorialidad. En este marco donde encontramos los sistemas tecnológicos sociales y tecnologías de Hernán Thomas y colegas de la Universidad de Quilmes, Argentina, así como la noción de innovación para la inclusión social de Alzugaray, Mederos y Sutz (2011).

Regulación

En general, a nivel internacional se han dedicado menos recursos, tiempo y pensar a los aspectos sociales y políticos relacionados con las NC y NT. Los escasos textos sobre regulación, políticas públicas y gobernanza en su mayoría se publican en inglés, y poco se ha escrito sobre lo que sucede en Latinoamérica.⁷ Estudiar estos aspectos no es fácil, considerando que el mismo objeto a regular y motivo de la acción pública, es decir, la nanotecnología y los productos nanotecnológicos, como son los nanomateriales (partículas, tubos, fibras a nanoescalas), y servicios que hacen uso de nanobjetos y nanoprosesos en las distintas ramas de la industria son algo de lo que, hasta hace poco, muchos científicos

⁵ Algunos de los proyectos que han trabajado aspectos de regulación son: NANoREG – A COMMON European approach to the regulatory testing of nanomaterials; NANoREGII – Development and implementation of Grouping and Safe-by-Design approaches within Regulatory frameworks; NanoDefine – Development of an integrated approach based on validated and standardized methods to support the implementation of the EC recommendation for a definition of nanomaterial; ProSafe – Promoting the implementation of safe by design; GRACIOUS – Grouping, Read-Across and classification framework for regulatory risk assessment of manufactured nanomaterials and safer design of nano-enabled products; ACE-nano – Analytical and characterisation excellence in nanomaterial risk assessment: A tiered approach.

⁶ NanoSafety Cluster <https://www.nanosafetycluster.eu/>

⁷ Quizás las más activas en este tema son la Red Latinoamericana de Nanotecnología y Sociedad (ReLANS) y la Red Internacional de Nanotecnología, Sociedad y Medio Ambiente (Red-NanoSoMA), algunos de cuyos integrantes colaboran en este número de *Mundo Nano*.

sociales, servidores públicos y políticos estaban poco enterados. Sin embargo, por ser la nanotecnología una tecnología emergente y con gran potencial, el análisis académico de qué y cómo se está abordando desde la política pública es de suma importancia. Algo similar a lo que sucedió con la ingeniería genética, y, recientemente, con la inteligencia artificial y otras tecnologías de frontera.

¿Es la regulación de la NT una necesidad razonada o una carga innecesaria?

Para contestar esto, debemos recordar que, en términos generales, las normas se elaboran para regular una actividad, tecnología o producto, de forma que no cause daño a otros y en lo habitual para proteger de daños socio ambientales, aunque también puede ser con fines de protección económica y establecer estándares para el comercio o la seguridad. La regulación de la nanotecnología o sus productos es la acción política, pública o privada, de controlar la gestión de los procesos y productos de las NT de forma que se eviten afectaciones a la población en general y a la naturaleza, y ha surgido como respuesta al rápido desarrollo e implementación de las NT y la presencia de miles de nuevos materiales, cientos de ellos ya presentes en objetos de nuestra vida diaria y sin una regulación específica.

Agencias de gobierno, académicos y juristas discuten qué es lo que hay que regular: si debe ser la tecnología como tal, ver que sus procesos sean seguros; la investigación, para lo cual existen ya códigos de conducta voluntarios; la seguridad de los nanomateriales⁸ o los productos que los contienen; la seguridad y salud laboral y de los consumidores;⁹ la comercialización; las implicaciones ambientales; o, las libertades civiles (Bowman y Hodge, 2007; Monica y van Calster, 2014).

Por el universo a regular y por la incertidumbre que generan las implicaciones económicas, sociales, ambientales y culturales ha resultado difícil diseñar e implementar buenos instrumentos regulatorios para las NT, a pesar de haberse iniciado la discusión en Europa desde 1999 y aún con mayor fuerza desde 2004; para el caso de América Latina y México, los mecanismos regulatorios se han estado discutiendo a partir de 2007. Esta situación nos conduce a un problema en la toma de decisiones entre la ciencia y la política. Si bien la ciencia es necesaria para la toma de decisiones, muchas veces los conflictos de interés pueden enturbiar estos procesos, e incluso influir en el tipo de investigación y hasta en sus resultados (Bowman *et al.* 2013; Andresen *et al.*, 2018; Jassanof, 1986).

⁸ Existen diferentes propuestas de criterios para definir qué nanomateriales regular. Un criterio es según su volumen de producción y uso; otro, según información existente sobre su toxicidad; otro más, según el uso que se les dé.

⁹ Por ejemplo, actualmente existen regulaciones que exigen etiquetado en ciertos productos, sobre si contienen NMs, asimismo, han prohibido algunos NMs en aplicaciones concretas; la propiedad intelectual.

Para tener información confiable de cuáles son los daños reales y los posibles riesgos de las NT, o mejor dicho de sus productos, la organización y coordinación internacional ha sido esencial en el desarrollo de pruebas y metodologías de investigación estandarizadas, así como en el estudio de los efectos a la salud y al ambiente de los nanomateriales.¹⁰ Los países de la región no tienen una activa participación en las iniciativas internacionales como las coordinadas por la OCDE, pues gran parte de ellos no son miembros con excepción de Chile, Colombia y México; algunos pocos como Brasil colaboran en proyectos del NanoSafety Cluster; y la realidad es que los países de la región se encuentran al margen de esta coordinación.

Es así como hoy en día sabemos que ciertos nanomateriales como, por ejemplo, los nanotubos de carbono, la nano plata o el nano dióxido de titanio son peligrosos en ciertas aplicaciones. Sin embargo, aún se sabe poco al respecto, o se han investigado a fondo pocos de los miles de NMs que existen, muchos de ellos ya en uso. Por otro lado, también reconocemos que la regulación y política pública son fundamentales para asegurar que se destinen los recursos suficientes para llevar a cabo la investigación necesaria.

Otro aspecto observado en el proceso de ir regulando las NT y sus derivados es que este se ha dado en forma incremental, es decir, los instrumentos existentes se han ido adecuando para ir incluyendo lo “nano” en lugar de crear nuevos instrumentos que sean nanoespecíficos,¹¹ a pesar de haber habido ya propuestas a nivel internacional (ICTA, 2007) y recomendaciones nacionales para estudiar la posibilidad de diseñarlos. Sin duda, otro tinte transversal es la inclusión de un enfoque precautorio en este proceso, tema ampliamente discutido en el ámbito académico, en el de las organizaciones de la sociedad civil y en el gubernamental (Saldívar, 2019). Para muchos expertos en asuntos de nanoseguridad, el principio de precaución es fundamental para tratar con las incertidumbres, la complejidad y los riesgos ambiguos de los nanomateriales, de forma que un enfoque precautorio es necesario en su manejo, la toma de decisiones y su regulación (Warshaw, 2012; Andorno, 2014; Kuraj, 2017; Saldívar, 2020).

Como vemos, en el ámbito de la gobernanza y la regulación existe un recorrido importante por parte de académicos de todas las latitudes que proponen conceptos, criterios, metodologías y reflexiones para la conducción de las NT de una manera más o menos plural; aunque los enfoques no siempre hacen explícita la consideración de que los actores no cuentan con la misma oportunidad de hacerse escuchar. No obstante, es necesario pensar la gobernanza de esta tecnología de forma situada. Un paso necesario hacia ese rumbo es que las instituciones que dirigen la CyT, y todos aquellos interesados en la producción de conocimiento científico nos hagamos conscientes de la necesidad de hacer

¹⁰ Gran parte de este proceso se realiza en el Working Party on Manufactured Nanomaterial (WPMN) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y varios de los proyectos del Nanosafety Cluster.

¹¹ En Brasil hubo ya una propuesta de Ley, sin embargo, esta aún no se ha aprobado.

ciencia politizada, en el sentido de Oscar Varsavsky,¹² esto es, tener una actitud reflexiva sobre las consecuencias que conlleva el desarrollo científico técnico, reivindicar el compromiso social de nuestras investigaciones y priorizar el interés colectivo por encima del interés académico individual.

También, podríamos empezar acercándonos a los estudios decoloniales y la noción de colonialidad del saber, a fin de reflexionar sobre las prácticas científicas que permean el desarrollo nanotecnológico en las universidades y que reflejan la colonialidad del saber. Pensar la gobernanza y las políticas públicas hacia las nanotecnologías en clave decolonial tendría que pasar por reconocer las prácticas en las que esta se expresa. A modo de ejemplo mencionaremos algunas de ellas: en los sistemas de evaluación que mandatan publicar en revistas de países del Norte Global y de habla inglesa, cuya consecuencia inmediata es limitar la difusión de ese conocimiento a quienes tienen acceso a esas revistas y conocen el idioma; en la priorización que dan los financiamientos públicos a investigaciones de grupos internacionales en donde se corre el riesgo de estar aportando soluciones a problemas de otros contextos, no los nuestros; al mantenimiento de los pilares de la modernidad como principios del desarrollo científico técnico: el control y manipulación de la naturaleza (a escala nanométrica), eficiencia y rentabilidad.

Finalmente, es urgente integrar el pensamiento crítico en los programas de posgrado en nanotecnología, y tomarnos más en serio la realización de proyectos conjuntos entre científicos sociales y nanotecnólogos, en particular en los desarrollos dirigidos a la medicina, agricultura, agua, energía, de los cuales depende el futuro.

Nos parece afortunado que la revista *Mundo Nano* tenga un número dedicado exclusivamente al asunto de la gobernanza, las políticas públicas y la regulación de las nanociencias, la nanotecnología y sus productos. El número cuenta con textos que analizan la situación de las NT en seis países de la región: Argentina, Brasil, Costa Rica, México, Uruguay y Venezuela. El lector encontrará dos textos sobre gobernanza, uno con énfasis en nanomedicina y otro en el aspecto laboral; de regulación también hay textos sobre las experiencias brasileña y argentina. Hay dos textos que analizan las políticas públicas, uno para el caso en México, y aspectos de innovación de Costa Rica, Uruguay y Venezuela, tres países donde el tema de la nanotecnología es emergente.

Agradecemos a los autores por su respuesta a la convocatoria y sus contribuciones que, sin duda, ayudan a ir completando ese rompecabezas que es el entendimiento del desarrollo e implementación de la nanociencia, la nanotecnología y sus productos en América Latina. Asimismo, agradecemos a los revisores que nos apoyaron y fueron parte importante del cuidado de la calidad de este número. Finalmente, queremos agradecer a los editores de la re-

¹² Oscar Varsavsky fue un científico argentino que contribuyó de manera importante a conformar el pensamiento latinoamericano en ciencia, tecnología y desarrollo (PLACTED) en la década de los años setenta. Sobre su pensamiento véase Bilmes *et al.* (2018).

vista que nos confiaron esta tarea por demás interesante e ilustradora de ser editoras invitadas.

Mónica Anzaldo Montoya y Laura Saldívar Tanaka
Editoras invitadas

Referencias

- Alzugaray, Santiago, Leticia Mederos y Judith Sutz. (2011). La investigación científica contribuyendo a la inclusión social. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 6 (17): 11-30.
- Andorno, R., Biller-Andorno, N. (2014). The risks of nanomedicine and the precautionary principle. En B. Gordijn y A. M. Cutter (eds.), *In pursuit of nanoethics*. The International Library 131 of Ethics, Law and Technology 10, Springer Science Business. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6817-1_9
- Andresen, S., Rosendal G. K., Skjærseth J. B. (2018). Regulating the invisible: interaction between the EU and Norway in managing nano-risks. *Int Environ Agreements*, 18: 513-528
- Anzaldo, M. (2019). Las agendas estatales de innovación en México: ¿gobernanza científica discrecional o de mercado? *Trilogía Ciencia Tecnología Sociedad*, 11(21): 223-254. <https://doi.org/10.22430/21457778.1296>
- Anzaldo, M. y Chauvet, M. (2016). Technical standards in nanotechnology as an instrument of subordinated governance: Mexico case study. *Journal of Responsible Innovation*. <https://doi.org/10.1080/23299460.2016.1196098>
- Barben, D., Fisher, E., Selin, C. y Guston, D. H. (2008). 38 Anticipatory governance of nanotechnology: Foresight, engagement, and integration. *The handbook of science and technology studies*, 979.
- Beck, U. (1998). *La Sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*. Paidós. 393 p.
- Bilmes, G., Carrera, J. Andrini, L. y Liaudat, S. (2018). Ética, ciencia y compromiso político. Opciones y alternativas desarrolladas por científicos/as sensibles a los problemas sociales. En María Graciela de Ortúzar (comp.), *Ética, ciencia y política. Hacia un paradigma ético integral en investigación*. FaHCE-Universidad de la Plata: Argentina, 61-87.
- Boni, Alejandra, Giachi, Sandro, Molas-Gallart, Jordi. (2019). *Towards a framework for transformative innovation policy evaluation*. TIPIC Research Report. Science Policy Research Unit (SPRU), University of Sussex Business School.
- Bowman, D. M. y Hodge, G. A. (2007). A small matter of regulation: an international review of nanotechnology regulation. *The Columbia Science and Technology Law Review*, VIII: 1-36.
- Bowman, D. M., Stokes, E. y Bennett, M. G. (2013). Anticipating the societal challenges of nanotechnologies. *Nanoethics*, 7: 1-5.
- Comisión Europea. (2001). *European governance: A white paper*. https://www.ab.gov.tr/files/ardb/evt/1_avrupa_birligi/1_6_raporlar/1_1_white_papers/com2001_white_paper_european_governance.pdf

- Chauvet, Michelle. (2009). GATTACA vs Tlayoli: la dimensión socioeconómica y bio-cultural del Protocolo de Cartagena. *Revista Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 9(17): 89-114, junio.
- Duque, Y., M. Cardona y J. Rendón. (2013). Responsabilidad social empresarial: teorías, índices, estándares y certificaciones. *Revista Cuadernos de Administración*, 29(50): 196-206. Universidad del Valle. <http://www.scielo.org.co/pdf/cuadm/v29n50/v29n50a09.pdf>
- European Commission. (EC, 2009). Commission recommendation on A code of conduct for responsible nanosciences and nanotechnologies research & Council conclusions on Responsible nanosciences and nanotechnologies research. 24p.
- European Parliament (EP). (2009). *Report on regulatory aspects of nanomaterials*. Committee on the Environment, Public Health and Food Safety Rapporteur: Carl Schlyter (2008/2208(INI), 21 p.
- Forsberg, E. M. (2012). Standardisation in the field of nanotechnology: some issues of legitimacy. *Science and Engineering Ethics*, 18(4): 719-739.
- Guston, David H., Fisher, Erik, Grunwald, Armin, Owen, R., Swierstra, T. y Van der Burg, S. (2014). Responsible innovation: motivations for a new journal. *Journal of Responsible Innovation*, 1: 1-8. <https://doi.org/10.1080/23299460.2014.885175>
- Guston, D. H. y D. Sarewitz. (2002). Real-time technology assessment. *Technology in Society*, 24(1-2): 93-109.
- Hagendijk, R. y Irwin, A. (2006). Public deliberation and governance: engaging with science and technology in contemporary Europe. *Minerva*, 44(2): 167-184.
- International Center for Technology Assessment (ICTA). (2007). Principles for the oversight of nanotechnologies and nanomaterials. *Acción ecológica*. <http://www.iufdocuments.org/www/documents/Principles%20for%20the%20Oversight%20of%20Nanotechnologies%20and%20Nanomaterials.pdf>
- Jasanoff, Sheila. (1986). *Risk management and political culture*. Russell Sage Foundation 93 p.
- Jasanoff, Sheila (ed.). (2004). *States of knowledge: the co-production of science and the social order*. Routledge.
- Kjølberg, K. L. y Strand R. (2011). Conversations about responsible nanoresearch. *Nanoethics*, 5: 99-113.
- Konrad, K., Van Lente, H., Groves, C. y Selin, C. (2017). 16 Performing and governing the future in science and technology. *The handbook of science and technology studies*, 465.
- Kuraj, N. (2017). *REACHing an environmental regulation for nanotechnology. An analysis of REACH as an instrument for preventing and reducing the environmental impacts of nanomaterials*. Disertación, Facultad de Derecho, Universidad de Oslo, 451 p.
- Landeweerd, L., Townend, D., Mesman, J. y Van Hoyweghen, I. (2015). Reflections on different governance styles in regulating science: A contribution to 'Responsible Research and Innovation'. *Life Sciences, Society and Policy*, 11(1): 8. <https://doi.org/10.1186/s40504-015-0026-y>
- Monedero, J. C. (2009). *El gobierno de las palabras: Política para tiempos de confusión*, 1a ed. Fondo de Cultura Económica.

- Monica, J. C. y Van Calster, G. (2010). A nanotechnology legal framework. En Hull M. y Bowman, D.(eds). *Nanotechnology environmental health and safety: Risks, regulation and management*. Elsevier Science & Technology, 97-140.
- Owen, Richard, Macnaghten, Phil y Stilgoe, Jack. (2020). Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. En *Emerging technologies: Ethics, law and governance*. Routledge, 117-126.
- Parente, D. (2010). *Del órgano al artefacto*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Poletti, P. Piccinni, M. y Arnaldi, S. (2011). Los Principios de Creta sobre acceso a las nanotecnologías para la salud humana. En Arnaldi *et al.* (eds.), *Nanomedicina, entre políticas públicas y necesidades privadas*. UNAM, 185-188.
- Rip, A. y te Kulve, H. (2008). Constructive technology assessment and sociotechnical escenarios. En E. Fisher, C. Selin y J. M. Wetmore (eds.), *The yearbook of nanotechnology in society, I. Presenting futures*. Springer International Publishing, 49-70.
- Sarewitz, D. (2011). Anticipatory governance of emerging technologies. En *The growing gap between emerging technologies and legal-ethical oversight*. Springer, Dordrecht, 95-105.
- Saldívar-Tanaka, Laura. (2020). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional para la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13 (24): 1e-27e, enero-junio. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>
- Saldívar-Tanaka, Laura. (2019a). Regulando la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 12(22): 1e-21e, enero-junio. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.63140>
- Saldívar-Tanaka, Laura. (2019b). *Regulando lo invisible. Necesidad del principio de precaución en la política de nanotecnología en México*. Tesis de doctorado, CEDUA, El Colegio de México, 310 p.
- Stilgoe, Jack, Owen, Richard y Macnaghten, Phil. (2013). Developing a framework for responsible innovation. *Research Policy*, 42(9): 1568-1580. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- Stilgoe, Jack y Guston, David, H. (2017). Responsible research and innovation, 853-880. En Felt, Ulrike (ed.), *The handbook of science and technology studies*, 4a ed. The MIT Press.
- Trump, Benjamin D. (2017). *Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore*. *Health Policy*, 121(11): 1139-1146. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
- Warshaw, J. (2012). The trend towards implementing the precautionary principle in US regulation of nanomaterials. *Dose-Response* 10: 384-396. <https://doi.org/10.2203/doseresponse.10-030.Warshaw>
- Zwart, Hub, Landeweerd, Laurens y Van Rooij, A. (2014). Adapt or perish? Assessing the recent shift in the European research funding arena from 'ELSA' to 'RRI'. *Life Sciences, Society and Policy*, 10(1): 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0011-x>

Editorial

Editorial

Este número ratifica el carácter interdisciplinario de *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*. El enfoque puesto en la gobernanza, las políticas públicas y la regulación de las nanociencias y la nanotecnología (NyN) refrenda una vez más el interés de este proyecto editorial para estimular el diálogo entre las ciencias naturales y exactas y las ingenierías, con las ciencias sociales y las humanidades.

Al mismo tiempo en que el potencial de las NyN se generalizara, especialmente a principios del siglo XXI, la reflexión sobre sus implicaciones económicas, sociales, ambientales, éticas y legales no se hizo esperar. Desde entonces, las lecturas sobre los impactos positivos y negativos, propias de muy diversos marcos epistemológicos, han permeado la literatura sobre el avance de este campo de conocimiento e innovación. La articulación de tales reflexiones con el quehacer científico y tecnológico también se ha fomentado, incluso desde los propios marcos de financiamiento de, por ejemplo, la Unión Europea y la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos. El camino por estructurar y fortalecer la interfaz ciencia-política es aún largo, particularmente en las NyN donde los esquemas de gobernanza y regulación no son en la actualidad lo suficientemente robustos y, en algunos casos, todavía no se desarrollan. En tal contexto, interesa explorar el estado de situación en México y América Latina en tanto región con características similares, socioeconómicas, políticas e incluso culturales, así como de dependencia tecnológica, ello debido a la existencia de capacidades limitadas para la investigación y el desarrollo de las ciencias y la tecnología.

El presente número ofrece una revisión para seis países de la región —Argentina, Brasil, Costa Rica, México, Uruguay y Venezuela—, abordando aspectos diversos de la gobernanza, la política pública y la regulación desde aproximaciones epistémicas diversas.

El trabajo de Saldívar Tanaka hace un recuento detallado en torno a la política pública en las NyN en México, a partir de una lectura comparada con el contexto internacional, la cual le permite proponer una serie de recomendaciones de país.

El trabajo de Chiancone *et al.* aborda para los casos de Costa Rica, Uruguay y Venezuela, los procesos de institucionalización e internacionalización de las NyN, identificando las principales pautas de tales procesos y los desafíos que son comunes. Su análisis comparado comprende cuestiones relativas al diseño de las políticas públicas, la producción científica, la colaboración internacional y los procesos de innovación de dichos países.

Desde una mirada centrada en la fuerza de trabajo que hace uso de nanoprocesos o insumos derivados de innovaciones nanotecnológicas, Abel Arcuri

et al. ofrecen una valoración de los impactos de las nanotecnologías en la salud de los trabajadores en Brasil, a partir de analizar la gobernanza de las NyN en ese país, en especial las acciones que suponen avanzar hacia modelos de gobernanza participativa.

En su trabajo, Berger *et al.* muestran una reflexión sobre escenarios normativos de gobernanza y regulación de las NyN en Brasil y Argentina, haciendo uso de una noción de gobernanza que supone una nueva modalidad de gestión de lo público, en este caso de la innovación y la regulación de aspectos ambientales, sanitarios y de análisis y gestión del riesgo de las NyN. Desde ahí, los autores develan tanto los obstáculos existentes para la protección de derechos, como las limitaciones para una efectiva participación ciudadana en la toma de decisiones públicas sobre el uso y los impactos de las nanotecnologías.

Pellin y Engelmann analizan, en cambio, la posibilidad de regular las innovaciones nanotecnológicas en Brasil a partir de la implementación de lo que se ha denominado como *sandbox regulatorio*, y que en el caso de este trabajo se basa en una experiencia brasileña de regulación de empresas financieras de base tecnológica en una etapa temprana. Los autores consideran que desde tal metodología es posible equilibrar las fuerzas político-económicas imperantes, habilitando así las mejores técnicas y el régimen jurídico necesario para controlar el riesgo en los sistemas sociales y medioambientales.

En un tenor similar, da Silva D'ávila *et al.* exploran los procesos de autorregulación en Brasil para pronunciarse a favor de una cartilla de lineamientos legales para emprendedores en el área de las NyN.

Meinguer Ledesma presenta una reflexión sobre la educación en NyN. Basado en trabajo empírico a nivel medio-superior en México, el autor presenta aspectos pedagógicos relevantes para la enseñanza de la nanoquímica, incluyendo los obstáculos, pero también las oportunidades para mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje de la ciencia en general y de las NyN en particular.

Finalmente, Soto-Vázquez *et al.* revisan el panorama de la gobernanza, la regulación, la ética y los riesgos asociados particularmente con la nanomedicina. Para ello, ponen a nuestro alcance un diagnóstico basado en el análisis sistemático de la literatura científica internacional desde el cual concluyen que, si bien hay avances en la evaluación de riesgos, aún existen importantes vacíos en materia de regulación.

Este número de *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología* incluye también una sección especial sobre nanomateriales, en la cual, González y Mata colaboran con una revisión sobre algunos métodos, tanto para sintetizar alúminas anódicas porosas con diámetros de poro extra-grandes, como para su estabilización térmica. El aporte es relevante de cara a múltiples y potenciales aplicaciones, desde la fabricación de nanomateriales multifuncionales y de sustratos para la detección de moléculas de interés químico y biológico, hasta su uso como filtros debido a su capacidad para bloquear de manera selectiva: virus, pequeñas moléculas orgánicas, sales e iones metálicos peligrosos.

Recomendaciones de política pública de nanociencia y nanotecnología en México: privilegiar el bienestar humano y ambiental

Recommendations for public policy on nanoscience and nanotechnology in Mexico: prioritizing human and environmental well-being

Laura Saldívar Tanaka*

ABSTRACT: This text presents a series of recommendations aimed at guaranteeing socio-environmental health and safety, which must be considered to be part of public policy on nanoscience (NC) and nanotechnology (NT). It starts with an introduction and a justification of why in Mexico it is necessary to adopt this type of measures. Then follows a presentation of the international context to be considered and, finally, twelve recommendations are presented, including explanatory arguments and some examples from other countries.

KEYWORDS: nanotechnology, nanoscience, policy recommendations, nano-security, Mexico.

RESUMEN: El presente texto aporta una serie de recomendaciones orientadas a garantizar la seguridad y salud socioambiental. Se considera que estas recomendaciones deberían integrarse a una política pública en materia de nanociencia (NC) y nanotecnología (NT). Inicia con una introducción y una justificación del porqué en México es necesario adoptar este tipo de medidas, para, más adelante, hacer una exposición del contexto internacional que es necesario considerar. Por último, se presentan doce recomendaciones, incluyendo argumentos explicativos y algunos ejemplos de otros países.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, nanociencia, recomendaciones de política, nano-seguridad, México.

Introducción

México requiere, para superar los múltiples obstáculos al crecimiento por los que atraviesa —como cualquier otro país en cambio y transformación—, de nuevas propuestas, conocimientos y tecnologías, así como de políticas públicas en materia de economía, industria, comercio, ciencia, tecnología e innovación que sean claras y explícitas. En materia de nanotecnología (NT), tal y como ha sucedido en otros temas, es necesario elaborar instrumentos de política *ad hoc* como leyes, reglamentos o planes, pues México carece de una política específica para NT, aunque ha habido acciones aisladas en asuntos de

Recibido: 20 de junio de 2020.

Aceptado: 27 de octubre de 2020.

* Investigadora independiente. Egresada de El Colegio de México.

Autora de correspondencia: lsaldivar@colmex.mx



nanociencia (NC) y NT (N+N). Hoy en día, el país no cuenta con mecanismos regulatorios para proteger a la población y al ambiente de posibles efectos no deseados que pueda ocasionar la NT o los productos que contengan nanomateriales. Lo anterior obedece a que la política de ciencia, tecnología e innovación privilegió, durante los últimos sexenios, ciertos paradigmas tecnocientíficos, como el crecimiento económico y la inversión por encima de otros aspectos que tienen que ver con lo social y lo ambiental (Saldívar, 2019b).

Al considerar el lugar estratégico de México como socio comercial de Estados Unidos (EUA) y que América Latina ocupa un importante nivel en desarrollo e inversión en N+N, es necesario contar de manera inmediata con una política explícita que garantice un desarrollo controlado, y dirigido a cubrir las necesidades del país con responsabilidad socioambiental.

Para solucionar estas carencias, es necesario analizar de forma integral las acciones públicas implementadas hasta ahora, evaluar sus efectos y hacer los ajustes necesarios, para, de tal forma, lograr una política sustentable y responsable en la materia. En este sentido, es posible identificar dos antecedentes clave: en primer lugar, la publicación en 2012, por la Secretaría de Economía, de los *Lineamientos para regulaciones sobre nanotecnologías para impulsar la competitividad y proteger al medioambiente, la salud y la seguridad de los consumidores*,¹ que fueron resultado del esfuerzo coordinado por el Centro Nacional de Metrología (Cenam), a partir de reconocer la necesidad de contar con reglas para promover la competitividad e intercambio en materia de NT, durante una reunión del Consejo de Alto Nivel para la Armonización Regulatoria México-EUA.

La segunda acción fue la presentación, en 2015, por la Red Temática de Nanociencia y Nanotecnología (RNyN) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), del *Plan Nacional para la Nanoseguridad en México*,² que incluía, entre otros:

[...] acciones sistemáticas que propicien o conlleven seguridad para la salud humana y la preservación del ambiente ante la presencia de nanomateriales, y de los productos que los contengan en todas las etapas de sus ciclos de vida [...] [como:] caracterización confiable de las propiedades relevantes de los nanomateriales mediante métodos armonizados, el análisis de la toxicidad y el riesgo por la exposición a los nanomateriales, la propuesta de regulaciones sobre el tema y la comunicación de información oportuna y confiable a la sociedad. (RNyN, 2015: 21).

Con el propósito de contribuir con las sugerencias de la Secretaría de Economía y la RNyN, presentamos doce recomendaciones, resultado del análisis de la experiencia mexicana, de los EUA y de la Unión Europea (UE), así como de la opinión de diversos expertos nacionales en la materia (Sal-

¹ En adelante *Lineamientos*.

² En adelante *Plan Nanoseguridad*.

dívar, 2019b); estas recomendaciones constituyen los elementos de una *Propuesta integral de gobernanza precautoria del riesgo de las NT en México*, que se explicitan de manera individual más adelante.

Avances internacionales en nanotecnología

El rápido y creciente desarrollo y aplicación de N+N constituye una realidad que, expresada en datos de los que al día de hoy se tiene registro: hay al menos 8,856 productos y 2,453 compañías que ofrecen productos de NT en 62 países.³ Estos productos contienen nanobjetos,⁴ nanoformas,⁵ nanopartículas o nanomateriales⁶ (NMs); el nanomaterial (NM) más utilizado es de plata, seguido del dióxido de titanio; y el sector industrial que más utiliza NMs es el de la electrónica, seguido de la medicina y la construcción. En poco más de dos décadas las N+N han sido adoptadas en prácticamente todos los países como una ciencia y una tecnología cuyos productos se han expandido rápida y ampliamente, sin embargo, son pocos los países que cuentan con políticas públicas específicas.

En la UE, la política pública en N+N comenzó en 1998, como parte de su programa de investigación en el *Framework Programme 5* (FP5) del periodo 1998-2002. A partir de entonces, ha estado siempre inserta y cada vez con mayor énfasis en sus programas de investigación, innovación y desarrollo *FP6*, *FP7* y *Horizon 2020*, contando con una inversión pública común entre 2001 y 2020 de €6,454.8 millones de euros (European Commission (EC), 2002, 2013, 2015, 2017 y 2020). Por su parte, EUA creó, en el año 2000, la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI, por sus siglas en inglés),⁷ en la que se coordina el trabajo de 25 agencias federales del gobierno americano en investigación, aplicaciones y regulación de N+N, es decir, desde un inicio la investigación y desarrollo en N+N se planteó como una iniciativa de gobierno que, desde el 2001, ha recibido al menos 29 mil millones de dólares de

³ *Nanotechnology products database* <https://product.statnano.com/> (Consultado el 26 de octubre, 2020).

⁴ NMX-R-27687-SCFI-2013 Nanotecnologías —Terminología y definiciones para nanobjetos— Nanopartícula, nanofibra y nanoplaca.

⁵ El término nanoformas se utiliza en la enmienda del Reglamento de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos (REACH) europeo, para referirse a: nanomateriales, nanobjetos, nanopartículas, nanofibras, nanotubos y nanoalambres, así como a los agregados y aglomerados de estos materiales incluyendo aquellos que exceden el tamaño de la nanoescala.

⁶ Se entiende un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50% o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm. En casos específicos y cuando se justifique por preocupaciones de medio ambiente, salud, seguridad o competitividad, el umbral de la granulometría numérica del 50 % puede sustituirse por un umbral comprendido entre el 1 % y el 50 % (CE, 2011). En este texto usaremos el término nanomateriales para referirnos a cualquiera de las tres categorías anteriores.

⁷ National Nanotechnology Initiative.

inversión pública (NNI, 2019). El gobierno chino, por su parte, estableció para el año 2000 su Comité Nacional Coordinador para Nanociencia y Tecnología,⁸ el cual, entre 2001 y 2010, tuvo una Estrategia Nacional de Desarrollo de la Nanotecnología;⁹ y, en 2003, fundó el Centro Nacional para Nanociencia y Tecnología¹⁰ (Springer Nature, 2018) y ha financiado a lo largo de los años cientos de proyectos en N+N. Por su parte, Brasil, el caso en América Latina más avanzado, emite, en el año 2005, el Programa Nacional de Nanotecnología (PNN), después de cinco años de discusión y acciones de apoyo por parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología. En particular, el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq)¹¹ fomenta más de una docena de redes de investigación específica en N+N; asimismo, financia la construcción de laboratorios y proyectos de investigación y desarrollo entre centros de investigación, universidades y empresas (Invernizzi *et al.*, 2012).¹²

Metodología

Se estudió con detenimiento la situación mexicana a la luz de la experiencia de EUA y la UE, y se complementó con lo manifestado por diversos expertos nacionales en la materia a los que se entrevistó¹³ (Saldívar, 2019b). En este análisis no se contrasta con la experiencia de otros países, tarea pendiente para un futuro. Las recomendaciones conforman los principales elementos que debería contener una política en materia de N+N para México, bajo los principios de precaución¹⁴ y la gobernanza anticipatoria¹⁵ para la seguridad ambiental y social. Estas se contrastan y complementan con elementos contenidos en los *Lineamientos* (SE, 2012) y en el *Plan Nanoseguridad* (RNYN, 2015). En el cuadro 1, se indican los temas que ya se mencionaban en estos documentos, y que están contenidos en la presente propuesta.

⁸ National Steering Committee for Nanoscience and Technology.

⁹ National Nanotechnology Development Strategy.

¹⁰ National Center for Nanoscience and Technology.

¹¹ N.del E.: su denominación era Conselho Nacional de Pesquisa (Consejo Nacional de Investigación), pero sus siglas CNPq, aún se mantienen (fuente: Wikipedia).

¹² Véase también Berger y Berger Filho en este número.

¹³ Este análisis se realizó como parte del trabajo doctoral para elaborar la tesis *Regulando lo invisible. Necesidad del principio de precaución en la política de nanotecnología en México*, en la que se estudiaron las experiencias de EUA y la UE.

¹⁴ El principio de precaución es un principio originalmente del derecho ambiental que poco a poco se ha extendido al dominio de la salud, que llama a tomar medidas cuando actividades, tecnología o productos puedan llevar a una daño inaceptable e irreversible, que es científicamente posible, pero del cual hay incertidumbre (SRU, 2011).

¹⁵ Se entiende por gobernanza aquella en la que se integran los procesos de discusión y decisión con el Estado, otros actores interesados como los académicos, empresarios y la sociedad civil (estos últimos sin ser necesariamente expertos, pero seguramente si afectados cuyas percepciones son importantes); anticipatoria, por tratarse de una tecnología y productos cuyos riesgos asociados son aun inciertos (García, 2012).

Cuadro 1. Aspectos contemplados parcialmente en propuestas previas.

Propuesta integral de gobernanza precautoria del riesgo de las NT en México	Lineamientos (número)	Plan Nanoseguridad (estabón)
1. Presupuesto etiquetado para I+D en N+N; al menos 5% para el estudio de los aspectos éticos, legales, sociales (nanoELS) y ambientales, de salud y seguridad (nanoASS) de la NT.		
2. Estudios de nanoASS.	7	B
3. Iniciativa que cubra nanoELS + nanoASS (nanoELSASS).	5	
4. Formación obligatoria en nanoELSASS.		
5. Registro nacional de NT.	6, 11	A
6. Análisis del marco normativo con criterios de nanoseguridad.	3	F
7. Grupo intersectorial que elabore una propuesta de Ley <i>ad hoc</i> .	1	
8. Principio de precaución rector de la nueva regulación.		
9. Sistema de información para la sociedad.	8	G
10. Procesos participativos de discusión y toma de decisiones.	9, 10	
11. Garantizar recursos para nano contingencias.		
12. Diagnóstico integral de la NT en México.		

Fuente: Elaboración propia.

Si bien estas recomendaciones se plantearon en el trabajo de tesis mencionado, en este artículo se modificaron y reorganizaron para hacer más fácil su exposición. Para cada una se sugiere cómo implementarlas, quiénes deberían ser los responsables y se argumenta el porqué se consideran importantes.

Propuesta integral de gobernanza precautoria del riesgo de las NT en México

La presente propuesta está compuesta por doce recomendaciones para contar con una política pública en materia de nanociencia y nanotecnología que garantice la seguridad y la salud socioambiental, a la par que apoya el desarrollo e innovación del sector.

1. **Presupuesto explícito en materia de investigación y desarrollo (I+D) de las N+N, con un porcentaje de al menos 5% para realizar investigación**

sobre los aspectos éticos, legales, sociales (nanoELS), así como de los impactos en el ambiente, la salud y la seguridad (nanoASS) derivados del desarrollo y uso de la NT y sus productos. Esta asignación debe ser solicitada por el Conacyt y la Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado, así como ser etiquetada por la Secretaría de Hacienda.

Determinar cuánto presupuesto se ha destinado en México en I+D de N+N es una tarea difícil, aunque varios académicos han hecho algunos intentos al respecto (Cimav, Funtec, SE, 2012; Anzaldo, Chauvet y Maldonado, 2014), y más difícil aún es calcular qué porcentaje de este ha sido destinado para nanoELS y nanoASS pero, a decir de expertos en el tema, el presupuesto y los recursos en general son aún insuficientes y no cubren los requisitos mínimos (Saldívar, 2019a). El monto de un 5% mínimo ha sido recomendado en EUA y la UE, sin embargo, ellos mismos no han cumplido con esta meta. Estimamos que garantizar presupuesto para hacer investigación en estos temas es primordial para facilitar que las innovaciones tecnocientíficas se desarrollen de forma responsable y segura; incluso para el mismo sector industrial debería ser una prioridad asegurar la inocuidad de sus productos antes de que estos se distribuyan para evitar posibles afectaciones socioambientales, así como prevenir futuras acciones legales en su contra.

2. Mayores recursos en infraestructura y capacidades humanas, destinados a proyectos de nano-eco-toxicidad, nano-toxicidad, nano-seguridad y análisis de nano-riesgos, comenzando con el análisis y evaluación de los ambientes laborales y las aplicaciones médicas,¹⁶ es decir, nanoASS.¹⁷

Esta recomendación va en el mismo sentido que lo propuesto en el *Plan Nano-seguridad* de la RNYN en los eslabones “B. Análisis toxicológico”, “C. Análisis de riesgo” y “E. Infraestructura” y dependen ampliamente de la recomendación anterior. En México, hasta hace poco, los estudios de nano-toxicidad y nanoASS se realizaban de forma aislada en distintas instituciones, con diferentes capacidades físicas y humanas, y con infraestructura muy por debajo de la instalada en EUA y la UE. Un proyecto que pretende cubrir los vacíos en nano-toxicidad y nano-ecotoxicidad es el Sistema Nacional de Evaluación

¹⁶Ciertas nano partículas pueden tener efectos tóxicos, debido a que sus propiedades particulares desencadenan reacciones sobre los mecanismos de defensa de los seres vivos (RS y RAE, 2004). Algunos de los NMs que ya tienen recomendaciones de límites de exposición laboral (occupational exposure limit – OEL) son los de carbono, plata y el dióxido de titanio, para los cuales ya se han demostrado efectos negativos en seres vivos. El caso de los nanotubos de carbono, por ejemplo, al tener comportamientos similares al asbesto (WHO, 2017).

¹⁷Si bien los NMs manufacturados no son necesariamente tóxicos, el aumento en su producción sí implica una mayor exposición a humanos, en especial trabajadores y otros seres vivos con efectos posiblemente agravados por el “efecto coctel” y las condiciones físico-químico biológicas particulares (Som *et al.*, 2011; Lungu *et al.*, 2015).

Nano Toxicológica (Sinanotox)¹⁸ donde confluyen 10 centros de investigación de seis instituciones de educación superior e investigación;¹⁹ aunque, debería ser una línea de investigación estipulada por el Conacyt y los Consejos de Ciencia y Tecnología de los estados. Dado los escasos recursos con los que se cuenta, será necesario priorizar. Un criterio es escoger aquellos NMs que tienen mayor presencia en el territorio mexicano, así como aquellos de los cuales ya existen sospechas de ser dañinos para el ambiente o la salud humana.

A partir de los datos generados por sistemas como el Sinanotox, se podrían realizar mejores análisis de riesgo tanto para el ámbito laboral como para el de los consumidores y el ambiente natural. En México contamos ya con dos normas técnicas (NMX) sobre riesgo ocupacional²⁰ y una recientemente publicada de métodos de detección toxicológica²¹ que de ser observados contribuirán a que mejore la seguridad de los trabajadores.

3. Programa o red nacional de investigación transdisciplinaria sobre los aspectos éticos, legales, sociales (culturales), ambientales, de salud y seguridad (nanoELS+nanoASS) cuyos hallazgos deben ser considerados para el diseño de cualquier instrumento de planeación, especialmente de índole regulatorio. Coordinado por la Secretaría de Salud con apoyo del Conacyt.

Esta recomendación coincide parcialmente con el lineamiento 5 que propone “llevar a cabo las actividades para el manejo de riesgos asociados con las nanotecnologías, con un enfoque multidisciplinario e integral, incluyendo los aspectos sociales, económicos y éticos relevantes”. La experiencia de los países que van a la vanguardia del desarrollo y aplicación de las N+N indica que, para poder asegurar que los productos nano son inocuos para la salud humana y ambiental, es necesario tener todo un sistema coordinado dependiente de los elementos de las dos primeras recomendaciones para poder funcionar. La tarea no es fácil y requiere de muchos recursos humanos y económicos, y un abordaje desde una perspectiva integral y sistémica.

Es por esto que a nivel internacional hay diversas iniciativas. Aquí mencionamos solo algunas, donde la coordinación entre naciones ha sido clave: el Grupo de Trabajo en Nanomateriales Manufacturados (WPMN)²² de la Or-

¹⁸Sinanotox es un consorcio de centros de investigación nacionales, que desarrolla modelos y tecnología, y proporciona servicios de evaluación toxicológica de NMs con modelos *in vivo* e *in vitro*. Es una “plataforma de referencia nacional de los materiales nanoestructurados que evaluará la inocuidad en la salud y en el ambiente” (Luna, 2017). Para mayor información sobre el Sinanotox y algunas investigaciones de sus miembros, véase *Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 2018, 11(20 y 21), UNAM.

¹⁹UNAM (IFC, IBT y el CNyN); CINVESTAV (Querétaro, Saltillo y Zacatenco); UASLP, CIA-TEJ y UGto Instituto Tecnológico de Educación Superior de Monterrey.

²⁰NMX-R-12901-1-SCFI-2015 y NMX-R-12901-2-SCFI-2016

²¹NMX-R-16197-SCFI-2019

²²Working Party on Manufactured Nanomaterials.

ganización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), establecido en 2006 para estudiar la toxicidad, los riesgos y la seguridad de los NMs. El Cluster de Nanoseguridad (NSC)²³ formado en la UE en 2008 con la finalidad de coordinar y planear la estrategia de investigación en el tema de nanoseguridad, donde se reúne y procesa la información necesaria para que los tomadores de decisiones (reguladores, servidores públicos, industriales y sociedad civil) hagan su trabajo (NSC, 2017). El proyecto *ProSafe* de la UE (*ProSafe*, 2017) cuyo propósito era coordinar y apoyar los esfuerzos para ampliar el conocimiento sobre nanoASS, a través del análisis de los resultados de distintos proyectos y publicaciones, con el propósito de generar un documento conjunto que guíe el trabajo de los reguladores y la industria; así como el NANOREG²⁴ del 2013 y el NANOREG II del 2015²⁵ en los cuales se buscaba crear un marco común de pruebas reglamentarias de NMs para la UE. Asimismo, en Europa existen grupos y proyectos específicos que estudian las implicaciones éticas del despliegue de la NT, entre estos podemos mencionar el Grupo Europeo sobre Ética en la Ciencia y Tecnología (EGEST),²⁶ que considera la amplísima gama de aplicaciones y sectores en los que la NT se usa y se proyecta para analizar con detenimiento las implicaciones ELS.

4. Planes de estudio en materia de N+N que incluyan materias obligatorias sobre nanoELS y nanoASS, esto es, complementar la formación tecnocientífica, con una perspectiva socioambiental y humanista. Requisito en los Programas Nacionales de Posgrados de Calidad del Conacyt; sugerido y supervisado por la Secretaría de Educación Pública.

Este es un tema poco discutido. Sin embargo, expertos en el campo de la (eco)toxicidad y salud (Saldívar, 2019b) señalan que sería deseable que los planes de estudio en N+N incluyeran de manera obligatoria materias capaces de proporcionar a los futuros nanocientíficos y nanotecnólogos conocimientos sobre las perspectivas y metodologías para analizar los posibles efectos al ambiente, a los humanos y a la sociedad en general de los NMs que puedan desarrollar (sintetizar y/o funcionalizar). Es decir, familiarizarlos con aspectos nanoASS, nanoELS y análisis de riesgo.

5. Registro nacional de NT, que contenga información sobre las empresas que producen, importan y/o exportan nanomateriales, así como un lis-

²³Nanosafety Cluster.

²⁴A través de identificar qué aspectos de nanoASS son relevantes desde un punto de vista regulatorio; identificar cuáles son las lagunas en nuestro conocimiento; llevar a cabo la investigación para llenar los vacíos; desarrollar un marco y una caja de herramientas de NANOREG para probar los aspectos de ASS y para evaluar y gestionar los riesgos (NSC, 2017).

²⁵Estos tres últimos son proyectos en el marco del NanoSafety Cluster.

²⁶European Group on Ethics in Science and Technology.

tado de: NMs, volúmenes totales anuales utilizados, sus aplicaciones y la relación de las empresas o instituciones con que intercambian estos materiales; que incluya el registro de los productos de distribución nacional que contiene NMs. Coordinado por la Secretaría de Economía (SE) en colaboración con las Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader) y Secretaría de Salud (SS).

Esta recomendación coincide parcialmente con los lineamientos 6 y 11 y el eslabón “A. Identificación de nanomateriales relevantes para el país y capacidades relacionadas” del *Plan Nanoseguridad*. Para poder actuar se requiere tener un panorama real de la cantidad y distribución de los NMs. Si bien, no olvidemos que una característica esencial de los NMs es su tamaño diminuto que los vuelven invisibles incluso con equipos muy sofisticados, de manera que para saber dónde están, la única manera de trazarlos es a través de registros. Tener un registro de los NMs presentes en el país en las diferentes etapas de su ciclo de vida es esencial para su monitoreo y así poder responder en caso de contingencia (RIVM, 2009); asimismo, esta información puede ser de utilidad con fines comerciales.

Internacionalmente ha habido diversos intentos de hacer listados e inventarios de lo nano, los primeros fueron el Inventario de Productos de Consumo²⁷ lanzado en 2006; el *Nanodatabase*;²⁸ y la Base de Datos de Productos de Nanotecnología.²⁹ Los listados de productos que contienen NMs son útiles tanto con fines comerciales como para que los consumidores puedan tomar decisiones, tal es el caso del *Nanodatabase* danés en que los productos registrados llevan una categoría de nanorriesgo según su posible exposición y efectos al ambiente o a la salud humana. También el registro señalado debería ser de tipo oficial y obligatorio, como los que ya se han implementado en Francia, Suecia, Bélgica, Noruega y Dinamarca, con la finalidad de recopilar información y dar seguimiento a los NMs, al menos en su etapa de producción (Saldívar, 2020).

En México ya contamos con un Inventario Nacional de Sustancias Químicas (INSQ) en donde se podrían incluir de forma específica las sustancias en su forma nano. Sin embargo, este tiene un subregistro, pues únicamente se registran los químicos que tienen contacto directo con los humanos, en su mayoría regulados por el sector salud y algunos por el ambiental y agropecuario, por lo cual habría que hacer las adecuaciones pertinentes (Semarnat-INE, 2012).

6. Crear un grupo de expertos que lleve a cabo un análisis profundo de nuestro marco normativo y regulatorio, para identificar los vacíos existentes

²⁷Consumer Products Inventory. Proyecto del Woodrow Wilson International Center for Scholars.

²⁸Propuesto por *The Ecological Council*, el Department of Environmental Engineering de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) y el Danish Consumer Council. <http://nanodb.dk/>

²⁹Nanotechnology Product Database. <https://product.statnano.com/>

y cómo podemos hacer ajustes para que la NT y sus productos sean regulados, garantizando la seguridad laboral y la salud de los humanos y el ambiente, conformado por juristas, abogados ambientales, otros estudiosos especialistas en aspectos técnicos, toxicológicos, sociales de la NT y OSC especializadas. Este grupo debe elaborar una propuesta de Ley para la NT y presentar al grupo intersectorial. Coordinado por el Conacyt y con participación tanto del sector público como del privado.

7. Grupo intersectorial que revise el tema de la regulación de N+N, usando como insumo el producto de la recomendación anterior, y que presente una propuesta de Ley ad hoc, donde estén al menos las siguientes secretarías: Secretaría de Salud, Secretaría de Trabajo y Previsión Social, Semarnat, Sader y SE, junto con el Conacyt, las comisiones de Ciencia y Tecnología y Asuntos Legislativos (Poder Legislativo Federal), con representantes académicos, industriales y de la sociedad civil, garantizando la participación del sector laboral y ambiental.

Las dos recomendaciones anteriores abonan al eslabón “F. Regulaciones, del Plan de Nanoseguridad” del *Plan Nanoseguridad* y de los *Lineamientos 1 y 3*, y responden en gran medida al vacío y a las necesidades existentes en México, expresadas por expertos en la materia (Saldívar, 2019b).

La discusión de cómo regular lo nano se ha dado en diferentes ámbitos, quizás las primeras referencias fueron desde la academia en 1989 (Forrest, 1989; Fiedler y Reynolds, 1993; Royal Society y Royal Academy of Engineering, 2004; Bowman y Hodge, 2007; Bowman, 2017), después las organizaciones de la sociedad civil (OSC) (ETC, 2003; Greenpeace, 2007; CIEL, 2009) y agencias de gobierno a partir del año 2004 (EC, 2004; EPA, 2007; GAO, 2010). Las propuestas han sido desde declarar moratorias, elaborar regulaciones nanoespecíficas y modificaciones graduales a la regulación existente (incremental regulation), también las de regular solo a los NMs o aplicaciones que se consideran riesgosas, hasta regular con métodos voluntarios, es decir, dejar que sean los propios desarrolladores y comercializadores los que se regulen, y que los gobiernos no tengan injerencia (Saldívar, 2019a y 2020).

Hoy en día es evidente que las propuestas extremas, como por ejemplo implementar moratorias sugeridas por las OSC y la autorregulación de la industria, no han sido adoptadas o no funcionan por representar intereses opuestos. En cambio, vemos que tardíamente algunas naciones y organizaciones internacionales están estudiando cómo modificar sus marcos jurídicos existentes para regular la NT, para proteger desarrollos e intereses comerciales y también la salud humana, los consumidores, trabajadores y el ambiente³⁰ (STOA, 2012; PROSAFE, 2017; NSC, 2017). La cuestión para re-

³⁰Los juristas Diana Bowman y Graeme Hodge (2007) consideran que la NT se puede regular desde seis áreas normativas. Estas son: 1) seguridad de los productos; 2) libertades civiles;

gular N+N es que solo se ha planteado a nivel de códigos de conducta, es decir, de forma voluntaria (CCE, 2008; López y Paoli (2009).

Varios países³¹ han revisado sus marcos regulatorios para ver la forma de controlar diferentes aspectos de la NT y sus derivados. La UE ha hecho ya algunas adecuaciones a reglamentos (Saldívar, 2019a y b). Debido a que los nanomateriales son considerados sustancias químicas, el modo de regularlos es a través del Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las Sustancias Químicas (REACH), y fue en 2018, después de casi 7 años de discusión, cuando se hicieron algunas enmiendas para hacerla, supuestamente,³² más nanoespecífica.³³

De tal modo, es necesario para México revisar qué leyes cubren las sustancias químicas en sus distintas etapas de manejo y ciclo de vida. De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2016), en la gestión de sustancias químicas son clave las siguientes leyes: Ley de Comercio Exterior, Ley Aduanera, Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos, Ley de Seguridad Nacional, Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas, Ley de Hidrocarburos, Ley de Petróleos Mexicanos, Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, Ley Federal sobre Metrología y Normalización; se encuentran también las leyes que regulan el cuidado del medio ambiente y la sanidad animal o vegetal: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), Ley Nacional de Aguas, Ley General de Cambio Climático, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas, Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, Ley de Productos Orgánicos, Ley Federal de Sanidad Vegetal y Ley Federal de Sanidad Animal; y aquellas las que velan por la salud humana: Ley General de Salud, Ley Federal para el Control de Precursores Químicos, Productos Químicos Esenciales y Máquinas para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos, Ley Federal de Trabajo, y, Ley General de Protección Civil.

Acompañando a estas leyes hay un gran número de reglamentos, sin embargo, a la fecha de la redacción de este texto, ninguna ley o reglamento

3) seguridad y salud laboral; 4) propiedad intelectual; 5) derecho internacional, y, 6) derecho ambiental. De allí que la regulación de la NT tiene mucho que abarcar.

³¹Australia, Bélgica, Brasil, Dinamarca, Canadá, China, Corea del Sur, Francia, Japón, Taiwán y Nueva Zelanda han revisado sus regulaciones para ver cómo se pueden adaptar a la NT y sus NMs, en algunos casos ya han hecho propuestas de ley nanoespecíficas (Bowman y Hodge, 2007; Bowman, 2017; Saldívar, 2019a).

³²La OSC Center for International Environmental Law (CIEL, 2017) publicó sus comentarios respecto a estas modificaciones e indicó varios aspectos que quedaron pendientes o tratados inadecuadamente. Además, se señala que se llevó casi 7 años en hacer las adecuaciones al REACH. Lo mejor hubiera sido hacer una Ley nano-específica, que fuera horizontal, tal y como lo habían sugerido varias voces.

³³Para una rápida explicación sobre cuáles fueron los principales cambios, véase Clausen y Hansen (2018) *The ten decrees of nanomaterials regulations*.

menciona nanomateriales, nanobjetos, nanoformas o nanopartículas como material controlable. Los únicos instrumentos que se refieren a los mismos son los ya señalados: *Lineamientos para regulaciones sobre nanotecnologías para impulsar la competitividad y proteger al medio ambiente, la salud y la seguridad de los consumidores* (SE, 2012) y los *Lineamientos para la operación orgánica de las actividades agropecuarias* (DOF, 2013), así como poco más de una docena de normas técnicas (NMX) sobre nanotecnología.

Los *Lineamientos* para NT fueron redactados “para que las dependencias y organismos reguladores del gobierno federal (...), emitan regulaciones sobre nanotecnologías en cualquiera de sus aplicaciones, y sobre los productos o servicios que contengan o hagan uso de nanomateriales producidos directa o indirectamente por el ser humano, en cualquier etapa del ciclo de vida de estos materiales.” (SE, 2012: 3). Es decir, la intención era que los reguladores incluyeran la protección a los consumidores, trabajadores y el ambiente ante posibles riesgos de la NT y sus productos. La discusión del contenido de estos la han hecho con anterioridad otros autores (Foladori y Záyago, 2014; Saldívar, 2019b). Es necesario insistir en que, quizás por su origen, estos lineamientos revelan una racionalidad instrumental y tecnocrática, y que a pesar de mencionarse el interés por aspectos sociales, ambientales e incluso éticos —además de la inclusión de otros actores en las tomas de decisión—, se reduce a un discurso retórico, mientras no existan los mecanismos que garanticen la definición e instrumentación en el campo de N+N de políticas más responsables e incluyentes (Saldívar, 2019b).

Hay en día, la función de normar la NT en México se da solo a nivel de normas voluntarias con las (normas técnicas) que se trabajan en el seno del Comité Técnico de Normalización Nacional en Nanotecnologías (CTNNN).³⁴ Desde 2014, el CTNNN ha trabajado al menos 30 proyectos, de los cuales se han publicado dieciséis, y otros tantos están en espera de declaración de vigencia, en etapa de consulta pública o en desarrollo. Hasta ahora 29 de estos se han elaborado a partir de estándares ISO/TC-229 *Nanotechnologies*, elaborados por el Comité Técnico No.229 de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO),³⁵ esto responde a la pertenencia de México a la ISO y al ISO/TC-229. Entre las normas vigentes, siete se refieren a caracterización y/o descripción,³⁶ seis a conceptos (vocabulario y términos), dos aluden a gestión de riesgos, una expone la evaluación de riesgos y otra describe el etiquetado voluntario (CTNNN/CENAM, 2019).³⁷

³⁴Este comité se crea en 2007, coordinado por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, en 2013 la coordinación pasó al CENAM y la Dirección General de Normas (DGN) de la Secretaría de Economía, con la función de elaborar las normas voluntarias para las NTs en México.

³⁵International Organization for Standardization.

³⁶Una de métodos toxicológicos.

³⁷Para consultar normas publicadas: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx>

Al ver la larga lista de leyes y reglamentos que se tendrían que reformar para hacerlos nanoespecíficos³⁸ resultaría más sencillo elaborar una ley *ad hoc*, que bien podría llamarse *Ley de nanoseguridad*, esto es, una versión nano, como la Ley de bioseguridad de organismos genéticamente modificados (DOF, 2005), la cual debería ser el resultado de un proceso participativo, donde el conocimiento de los expertos y la opinión de los distintos sectores involucrados/afectados sea considerado bajo los principios de sustentabilidad y precaución, haciendo valer lo establecido en los *Lineamientos* para NTs antes mencionados, pero priorizando el bienestar socioambiental y considerando aspectos éticos.

Finalmente, respecto a estas dos recomendaciones, cabe señalar que un análisis del marco regulatorio existente en México indica que:

[...] si bien México cuenta con normas técnicas, los aspectos de salud y seguridad humana y ambiental no están suficiente ni adecuadamente cubiertos al tratarse de normas voluntarias, y los instrumentos de tipo vinculante en materia de salud, ambiente, seguridad laboral y agropecuaria no son adecuados para regular los peligros y riesgos potenciales implicados en la NT y sus productos. (Saldivar, 2019b).

Asimismo, a partir del análisis de documentos y la opinión de expertos en la materia, la incapacidad de regular responde entre otros aspectos a la falta de recursos financieros, materiales y humanos, al desconocimiento sobre el objeto a regular y sus posibles implicaciones en la salud y el medio ambiente, a la falta de información sobre aspectos ELS asociados con la NT, así como a una escasa representatividad de todos los actores interesados en los limitados espacios de debate.

8. Marco regulatorio y guías en materia de N+N con enfoque precautorio en la gestión de riesgos, comenzando con una regulación que haga obligatorio el etiquetado de productos con NMs, para cumplir con el derecho de información. Con la participación de diversas instancias reguladoras.

A nivel internacional, pero principalmente en países de la UE, hay actores y sobre todo sectores (consumidores, trabajadores y grupos ambientalistas) que consideran que debería existir una regulación horizontal³⁹ específica para la NT y sus derivados (CIEL, Client Earth, BUND, 2012), es decir, un *NanoAct* (STOA, 2012). Esta opinión surge de la convicción de que una legislación de tipo “incremental” —o sea, la adecuación de las regulaciones exis-

³⁸Sabemos que actualmente se está dando una discusión sobre la posibilidad de integrar los nanoplaguicidas en el Reglamento en Materia de Registros, Autorizaciones de Importación y Exportación y Certificados de Exportación de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Sustancias y Materiales Tóxicos o Peligrosos (DOF, 2004).

³⁹La regulación horizontal es aquella que regula por sector, por ejemplo, la regulación ambiental, la de agricultura o salud, o en el caso europeo la de químicos; mientras que la vertical es por área o productos, por ejemplo, cosméticos, alimentos, agua.

tentes— no es suficiente para regular algo tan complejo e incierto. Dentro de esta postura se plantea que la nueva regulación debe incorporar un enfoque precautorio al estar tratando con materiales, productos y tecnologías sobre los cuales existe aún mucha incertidumbre, ignorancia e indefinición (Swiss Re, 2004; CIEL, 2009; Wickson, Gillund y Myhr, 2010; STOA, 2012; Hansen *et al.*, 2013; CIEL *et al.*, 2014; Kuraj, 2017). Otros principios también deseables de seguir son el de “responsabilidad del productor” y “el que contamina paga”, antes sugeridos por el Parlamento Europeo (De Sadeleer, 2002; EP, 2009; Ponce, 2010). Asimismo, y junto con la adopción de un enfoque precautorio, en general se aboga porque en el proceso se promueva el diálogo social participativo para que se dé una gobernanza de los posibles riesgos de esta tecnología.

En México, la postura es menos estricta, el Estado ha sido permisivo y ha facilitado la autorregulación por parte del sector industrial que prefiere no regular, o al menos no de forma que limite sus operaciones, sino con normas técnicas y voluntarias que le ayuden en la producción y comercialización. Por su parte, el sector académico sí considera necesario regular, pero no hay consenso sobre qué tipo de regulación implementar. Así, en la RNyN del Conacyt, donde confluyen principalmente nanotecnólogos y nanocientíficos y algunos representantes de la iniciativa privada y del gobierno, en una reunión a finales del 2012 se reconoció “la necesidad de una regulación oportuna en materia de nanotecnología, [y] elaborar normas para su desarrollo, para la protección de los trabajadores y de la sociedad” (RNyN, 2012).

El etiquetado es una medida útil para la gestión del riesgo, un complemento para los sistemas de registro de NMs, gracias al cual los consumidores pueden enterarse del contenido de NMs en el producto que adquieren. Internacionalmente, la solicitud de etiquetar proviene de varios sectores, principalmente de las organizaciones de la sociedad civil, representantes de los consumidores, academia y agencias de gobierno. Como era de esperar, las empresas son las menos convencidas, pues algunos consideran que puede ser contraproducente al volver más cautelosos a los consumidores. Incluso la Comisión de Comunidades Europeas (CCE, 2005), en el comunicado *Nanociencias y nanotecnologías: Un plan de acción para Europa 2005-2009*, recomendó examinar los requisitos para el etiquetado⁴⁰ y es así como posteriormente se modificaron las reglamentaciones de cosméticos (2009), alimentos (2011) y biocidas (2012), obligando a los productores a incluir en el etiquetado la mención de “nano” en caso de contener ingredientes en su forma na-

⁴⁰El criterio de qué se considera nano varía, por ejemplo, el Comité Científico en Riesgos a la Salud Emergentes y Nuevos e Identificados (SCENIHR, 2010) de la Comisión Europea recomendó que las sustancias que tuvieron más de 0.15% de sus partículas de tamaño nanométrico se considerarán como NMs; sin embargo, en la definición de la CE de 2011 requiere que al menos 50% de las partículas estén en el rango de lo nano, esto es, 300 veces más de lo que la SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) recomendó.

nométrica. Más adelante, el panel de expertos Evaluación de Opciones Científicas y Tecnológicas del Parlamento Europeo (STOA, 2012) consideró que era necesario tener un etiquetado de los productos con NMs, así como un inventario, como una medida de transparencia del mercado para los consumidores y la trazabilidad.

En México, los *Lineamientos* hablan de tener a la población informada, principalmente a los consumidores, sin embargo, no mencionan un etiquetado obligatorio; asimismo, tenemos ya una norma sobre etiquetado la NMX-R-13830-SCFI-2020 que es de carácter voluntario.

Otra forma de incorporar una racionalidad precautoria es la implementación de códigos de conducta, como el que ha recomendado la Comisión de las Comunidades Europeas (CCE, 2008). Para México, López y Paoli (2009) hicieron en 2009 una propuesta de un código de ética para la nanomedicina.

9. Sistemas de información a la sociedad (consumidores, trabajadores) sobre el desarrollo en la materia, así como los posibles pros y contras, haciendo uso de las tecnologías de la información, con bases de datos y repositorios digitales que alberguen artículos y reportes sobre el tema. Esfuerzo coordinado entre SS (Cofepris), Conacyt, STPS, Semarnat, Sader y SE, entre otras.

Esta recomendación coincide en parte con el lineamiento 8 y el eslabón “G. Información a la sociedad”, del *Plan Nanoseguridad* de la RNyN. De este tema —del que se ha hablado bastante—, ni se ha concretado nada, ni se ha elaborado con un lenguaje comprensible para el público. En México existen algunas plataformas virtuales y algunos centros de investigación o empresas que suben información de sus investigaciones o productos, pero en general no hay materiales.

Igual que con los organismos genéticamente modificados, al ser N+N áreas del conocimiento de reciente origen y, sobre todo, un tanto difíciles de entender por la población en general, es necesario realizar acciones de “nanoalfabetización”, es decir, explicar qué son N+N, con lenguaje sencillo y accesible, independientemente de presentar información sobre sus aplicaciones y posibles efectos tanto positivos como negativos. Además de realizar más acciones de divulgación, es necesario garantizar que, al menos de forma digital, en los centros de estudio superior y bibliotecas públicas estén disponibles artículos científicos sobre la materia.

En EUA y Europa existe suficiente información disponible para el público general en la Web de sitios oficiales, como la página del Observatorio de Nanomateriales de la Unión Europea (EUON),⁴¹ así como sitios de universidades, industrias e incluso de las OSC.

⁴¹ European Unión Observatory for Nanomaterials. <https://euon.echa.europa.eu/es/home>

10. Mecanismos de inclusión, informada,⁴² en el proceso de toma de decisiones respecto al desarrollo e implementación de la NT en México, que garantice la participación de otros actores clave e interesados, incluidos académicos sociales, representantes de trabajadores, consumidores y el medio ambiente.

Esta recomendación de alguna manera se expresa en los *Lineamientos* 8 y 10, sin embargo, *de facto*, en México, los foros donde se discute el desarrollo y la política de N+N han sido escasos, y, de igual modo, la participación ha sido mayoritariamente del sector académico, seguido del gubernamental y el empresarial. Incluso en el CTNNN que podría tener representación del sector laboral o de los consumidores, estos están ausentes (Foladori *et al.*, 2015; Saldivar, 2019b). Otro espacio donde sería deseable una mayor diversidad de perspectivas es la RNYN, en la que la participación de científicos sociales es aun escasa. Un grupo de científicos que podría integrarse en este sentido es el de la Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad (UCCS), el cual ya “participa junto con grupos y organizaciones sociales en la discusión amplia y objetiva de temas cruciales que involucran la ciencia y la tecnología”.⁴³

Desde la perspectiva de la ciencia, tecnología e innovación responsables es importante intensificar el diálogo sobre aspectos sociales y éticos, la seguridad, las provisiones gubernamentales y asegurar el involucramiento de otros actores de la sociedad (STOA, 2012; EU, 2013; Rip, 2014; Kuhlmann *et al.*, 2015). En la UE, por ejemplo, la Agencia Europea de Químicos (ECHA)⁴⁴ tiene comités donde debe haber representantes de OSC (laboral, consumidores y ambiente), así como en el WPMN del a OCDE y el TS-229 Nanotechnologies de la ISO, no obstante, en estos últimos, los viáticos los tienen que cubrir las mismas OSC, por lo cual es difícil su participación; para el caso de los comités de ECHA existe presupuesto destinado a solventar los gastos de viaje de los representantes de OSC.

11. Diseño y establecimiento de mecanismos financieros para contar con recursos económicos para atender posibles contingencias relacionadas con el desarrollo y expansión de la NT; así como monitorear el uso seguro de los NMs. Que el sector empresarial cubra la “carga de prueba”, esto es, que asuma los costos de los estudios que demuestren que su producto es inocuo para la salud humana y ambiental. Con opciones de subsidio gubernamental para las pequeñas y medianas empresas. Asimismo, pensar en instrumentos como las fianzas (anticipatory bonds), los seguros, y el que contamina [enferma o daña] paga. La supervisión de su cumpli-

⁴² Con ello no queremos decir que deben ser expertos en el tema, pero sí, al menos, poseer un conocimiento básico de la tecnología y el asunto a discutir, lo cual les ayudaría, a su vez, a desarrollar mejores argumentos para la discusión.

⁴³ Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad. <https://www.uccs.mx/uccs/acerca-de> (consultado 6 de junio, 2020).

⁴⁴ European Chemical Agency.

miento a cargo de las secretarías de Estado como, Hacienda, Salud y Medio Ambiente.

Teniendo en cuenta la difícil situación económica en que se encuentra el país, sería justo que los beneficiados económicamente de la comercialización de productos con NMs contribuyan con información en los análisis de riesgo, así como con los costes de una posible contingencia. En la UE, el Parlamento Europeo pidió, junto con la aplicación del principio de precaución, el de responsabilidad del productor y el principio de “el que contamina paga” en la regulación de la NT (EP, 2009) estos constituyen tres principios del derecho ambiental que los Estados incorporan cada vez más para poder hacer frente a la contaminación ambiental causada por fuentes humanas (De Sadeleer, 2002). No obstante, para que existan recursos a fin de garantizar la reparación del daño, es necesario establecer diversos mecanismos del tipo de incentivos [y castigos] económicos y/o fiscales, como el ya mencionado, “el que contamina paga”, como: asegurar garantías y responsabilidad civil causal (*liability*); incentivos fiscales para otras alternativas más limpias y seguras; supresión de subvenciones a prácticas, tecnologías y productos que entrañen peligro (Tickner, 2002).

12. Elaborar un diagnóstico transdisciplinario del estado del arte de N+N en México, que incluya: a) identificación clara de los distintos sectores y actores involucrados en las diferentes etapas de su ciclo de vida; b) identificación y descripción detallada de los impactos (positivos y negativos) de su despliegue en los ámbitos, económico, social y ambiental; c) la relación de los NMs presentes en el territorio y una revisión exhaustiva de la información (eco)toxicológica existente internacionalmente; d) propuesta de mecanismos de gestión del riesgo asociados con los NMs; e) propuesta de mecanismo de gobernanza de la NT. Se trata de que todo esto informe y guíe la creación de políticas públicas en materia de N+N y que garantice la seguridad de los mexicanos, con sustentabilidad y responsabilidad.

Contar con un panorama ordenado y claro del nivel de desarrollo de N+N sería de gran valor para guiar mejor las inversiones, los planes a futuro y su gestión en general. En México se han realizado pocos estudios con la intención de presentar un panorama del grado de avance de N+N. El primero de estos fue *Diagnosis of the development of nanoscience and nanotechnology in Mexico*, resultado de una colaboración entre el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, el Instituto Nacional de Ecología y el Department for Environment Food & Rural Affairs, del Reino Unido (IPICYT, INE, DEFRA, 2008) dentro de dicho diagnóstico se presenta el Programa Nacional de Nanociencia y Nanotecnología para Desarrollar Nuevas Bases Tecnológicas, que fue elaborado en el 2002 en un encuentro de varios días donde participaron

31 investigadores de diversas instituciones nacionales y extranjeras. El objetivo del Programa era “que [se] apoye y convoque a los grupos que ya realizan investigación sobre estos temas y que también promueva la formación de nuevos grupos y recursos humanos, para que mediante un esfuerzo conjunto y articulado, a través de proyectos multidisciplinarios, se desarrollen tanto investigaciones básicas, como productos y procesos, que culminen con nuevas tecnologías para que coadyuven a las soluciones de problemas nacionales en áreas como: energía, medicina, comunicaciones, agricultura, educación, etcétera” (IPICYT, INE, DEFRA, 2008: 59).

El segundo de estos estudios fue el *Diagnóstico y Prospectiva de la Nanotecnología en México*, elaborado por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, FUNTEC y la Secretaría de Economía (CIMAV, FUNTEC, SE, 2012), elaborado en un contexto donde la política de ciencia, tecnología e innovación del país priorizaba la competitividad económica y la innovación por encima de los aspectos sociales y ambientales. Importa señalar que este diagnóstico fue rector para dictar algunas de las agendas de NC y NT en México.

Después de estos diagnósticos, la RNYN ha publicado algunos datos, y, en 2016, *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología* de la UNAM publicó el *Catálogo nacional de instituciones de investigación con actividades en nanociencias y nanotecnología* (Zanella, Delgado y Contreras, 2016), el cual abarca casi el 60% de las instituciones dedicadas a N+N, incluyendo sus líneas y programas de investigación y docencia, infraestructura y capacidades en recursos humanos. Sumando lo también publicado en algunas tesis y publicaciones académicas, contaríamos ya con un gran avance para elaborar ese diagnóstico integral. A pesar de ello, nos parece que el panorama del grado de desarrollo industrial y algunos aspectos sociales, como la opinión de la gente, siguen faltando para contar con un mapa completo del desarrollo de N+N en México.

Conclusiones

Una política pública en materia de N+N, que busque ser integral y robusta y preocupada por vigilar la seguridad y la salud de los ciudadanos y el medio ambiente, debe integrar tanto los aspectos económicos, como los técnicos y comerciales. Deberá, asimismo, incorporar el estudio y discusión de sus efectos a nivel social y ambiental, así como las implicaciones éticas y legales, apelando al principio de precaución cuando existan sospechas de que ciertos usos o sus productos (nanomateriales) puedan entrañar daños inaceptables e irreversibles. Se debe estar del lado seguro y ser cautelosos mientras exista incertidumbre, confusión y ambigüedad ante algo tan complejo como pueden ser las interacciones de los NMs con los seres vivos y el medio ambiente.

Las medidas aquí expuestas buscan privilegiar el bienestar humano y ambiental. Como podemos observar, en propuestas y documentos previos

—si bien fueron elaborados con otros fines— ya existían coincidencias y llamados a realizar más estudios sobre los efectos a la salud y seguridad humana y ambiental. No obstante, es necesaria la elaboración de algún tipo de registro sobre los NMs que están presentes en territorio mexicano, llevar a cabo un análisis intersectorial y transdisciplinario de la regulación existente para adecuarlos y asegurar su utilidad en el control de la salud y seguridad, e informar a la sociedad en general.

Los rápidos avances, descubrimientos, diseños y creaciones tecnológicos en N+N; la incapacidad de los desarrolladores y el Estado de probar su inocuidad, y las sospechas de que algunos NMs pueden ser dañinos, son razones suficientes para que el Estado, en colaboración con otros actores, discutan seriamente la generación de una política explícita sobre el desarrollo y uso de N+N. Es decir, debemos tener una política con instrumentos legales de tipo anticipatoria y precautoria, con objeto de evitar riesgos y amenazas socioambientales no deseados, al tiempo que considerar los aspectos éticos, legales, sociales y ambientales. En tiempos de pandemia por el Covid-19, lo anterior se hace más urgente y necesario en vista del uso cada vez más común de NT y NMs en el desarrollo a nivel mundial de sistemas de diagnóstico y monitoreo, materiales de desinfección y control de propagación, fármacos y vacunas para atender los efectos del Covid-19 (Weiss, 2020).

En una actividad como esta, el rol de las instituciones de gobierno es primordial. Destacamos lo esencial del papel del Conacyt en muchas de las acciones de coordinación, para sentar las bases de una investigación ordenada y dirigida con el objetivo de obtener la información necesaria para guiar muchos de los trabajos que requieren la elaboración de políticas públicas. Sin embargo, como hemos visto, es necesaria la participación en este proceso de prácticamente todas las secretarías del gobierno federal, así como de muchos Consejos de Ciencia y Tecnología estatales. Por otro lado, los centros de investigación y enseñanza deben tener también un papel central, y por supuesto los representantes del sector industrial y de la sociedad civil, en la expresión de sus intereses y preocupaciones. Sin duda los resultados serán mucho más fructíferos, si lo hacemos adoptando modelos apropiados de gobernanza.

Consideramos que incorporando estas recomendaciones podríamos desarrollar una adecuada plataforma para conformar una política pública en materia de N+N. Se trata de una nano-iniciativa o plan nacional de NT y de una ley de nano-seguridad que aporten al desarrollo sustentable, responsable y seguro de N+N en México. De esta manera, el Estado mexicano estaría implementando varias de las acciones que EUA y sobre todo países de la UE han ido desarrollando en respuesta no solo a su obligación de proteger a sus ciudadanos, sino a las voces de otros actores que demandan certidumbre, orden y seguridad en el desarrollo y despliegue de la NT y el uso de sus derivados.

Referencias

- Anzaldo, M., Chauvet, M., y Maldonado, L. (2014). Fondos públicos para la investigación en nanotecnologías en México y el cambio de paradigma de la política de CTI. *Interciencia*, 39(1): 8-15.
- Bowman, D. (2017). More than a decade on: Mapping today's regulatory and policy landscapes following the publication of nanoscience and nanotechnologies. Opportunities and Uncertainties. *Noanoethics*, 11: 169-186. <https://doi.org/10.1007/s11569-017-0281-x>
- Bowman, D. y Hodge, G. (2007). A small matter of regulation: An international review of nanotechnology regulation. *The Columbia Science And Technology Law Review*, VIII: 1-36.
- Clausen, L. P. y Hansen, S. F. (2018). The ten decrees of nanomaterials regulations. *Nature Nanotechnology*, 13, sept., Comment: 766-768. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0256-2>
- Comisión de las Comunidades Europeas (CCE), (2005). *Nanociencias y nanotecnologías: Un plan de acción para Europa 2005-2009*. Comunicación, Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas.
- CCE (2008). *Recomendación de la Comisión de 7 de febrero de 2008 sobre un código de conducta para una investigación responsable en el campo de las nanociencias y las nanotecnologías*. Comisión de las Comunidades Europeas.
- Comisión Europea (CE). (2011). *Recomendación de la Comisión del 18 de octubre de 2011 relativa a la definición de nanomateriales*. Comisión Europea.
- CTNNN/CENAM (2019). *Las normas para las nanotecnologías en México*.
- Center for International Environmental Law (CIEL), (2009). *Addressing nanomaterials as an issue of Global concern*.
- CIEL (2017). *Comments on REACH annex revision*.
- CIEL et al. (2014). *European NGOs position paper on the Regulation of nanomaterials*. CIEL, EEB, BEUC, ECOS, Client Earth, ANEC, Earth care without Harm.
- CIEL, Client Earth, BUND. (2012). *High time to act on nanomaterials. A proposal for a 'nanopatch' for EU regulation*. Center for International Environmental Law, Friends of the Earth, Germany .
- CIMAV, FUNTEC, SE. (2012). *Diagnóstico y prospectiva de la nanotecnología en México*. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, FUNTEC y Secretaría de Economía.
- De Sadeleer, N. (2002). *Environmental principles: from political slogans to legal rules*. Oxford: Oxford University Press.
- DOF. (2004). REGLAMENTO en Materia de Registros, Autorizaciones de Importación y Exportación y Certificados de Exportación de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Sustancias y Materiales Tóxicos o Peligrosos. *Diario Oficial de la Federación*, 28 de diciembre de 2004, 32 pp.
- DOF. (2005). Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados. Nueva Ley publicada en el *Diario Oficial de la Federación*, 18 de marzo de 2005, 44 pp.
- DOF. (2013). ACUERDO por el que se dan a conocer los *Lineamientos para la Opera-*

- ción Orgánica de las actividades agropecuarias*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5319831&fecha=29/10/2013
- European Commission (EC). (2015). *Horizon 2020 Work Programme 2014 – 2015*. Decision C.
- European Parliament (EP). (2009). *Report on regulatory aspects of nanomaterials*. Committee on the Environment, Public Health and Food Safety Rapporteur: Carl Schlyter (2008/2208(INI), 21 pp.
- European Union (EU). (2013). Regulation (EU) No 1291/2013 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2013 establishing Horizon 2020 – the Framework Programme for Research and Innovation (2014-2020) and repealing Decision No 1982/2006/EC. *Oficial Journal of the European Union*, Bruselas: 70 pp.
- EC. (2017). *Horizon 2020 Work Programme 2016 – 2017*. Decision C.
- EC. (2020). *Horizon 2020 Work Programme 2018, 2019, 2020*. Decision C.
- EC. (2013). *Nanotechnology: The invisible giant tackling Europe's future challenges*. Directorate-General for Research and Innovation; Directorate-General for Industries and Technology.
- EC. (2002). *The sixth Framework Program in Brief*. Brief, European Commission, 35.
- EC. (2004). *Towards an European Strategy for Nanotechnology*. Communication from the Commission. Communication, European, Brussels.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2007). *Nanotechnology whitepaper*. Office of Science Advisor.
- ETC. (2003). *No small matter II: The case for a global moratorium. Size matters!* ETC group, 7(1): 20.
- Fiedler, F. y Reynolds, G. (1993). Legal problems of nanotechnology: An overview. *S. Cal. Interdisc. Law Journal*, 593: 593-630.
- Foladori, G. y Záyago, E. (2014). La regulación de las nanotecnologías en México. *Revista legislativa de estudios sociales y de opinión pública*, 7(14), 2014:123-146.
- Foladori, G., Arteaga, E., Zayago, E., Appelbaum, R., Robles-Belmont, E., Villa, L. et al. (2015). Nanotechnology in Mexico: Key findings based on OECD criteria. *Minerva* (53): 279-301.
- Forrest, D. (1989). *Regulating nanotechnology development*. Foresight Nanotech Institute, <http://www.foresight.org/nano/Forrest1989.html>
- García, H. A. (2012) Aprendiendo del futuro: gobernando la nanotecnología. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*. 20(7): 261-269.
- German Advisory Council on the Environment (SR). (2011) *Precautionary strategies for managing nanomaterials. Cap. 7: Conclusions and recommendations*. Junio. 40 pp.
- Government Accountability Office (GA). (2010). *NANOTECHNOLOGY Nanomaterials are widely used in commerce, but EPA faces challenges in regulating risk*. United States Government Accountability Office.
- Greenpeace. (2007). *Nanotechnology Policy & Position Paper*. Greenpeace.
- Hansen, S., Maynard, A., Baun, A., Tickner, J., y Bowman, D. (2013). Nanotechnology — early lessons from early warnings. En E. E. Agency, *Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation*, 530-559.

- INECC. (2016). Martínez Arroyo A., Paramo Figueroa V. H., Gavilán García A., Martínez Cordero M.A., Mendoza Cantú A., Cano Robles F. K. *Perfil Nacional de Sustancias Químicas*. México. 373 pp.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Instituto Nacional de Ecología, Department for Environment Food & Rural Affairs. (PICYT, INE, DEFRA). (2008). *Diagnosis of the development of the nanoscience and nanotechnology in Mexico*.
- Invernizzi, N., Köbes C., Fuck, M. P. (2012) Política de nanotecnología en Brasil: a 10 años de las primeras redes. En: Foladori G., Invernizzi N., y Záyago, E. (coords. 2012). *Perspectivas sobre el desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*. Cap. 3: 55-84.
- Kuhlmann, S., Elder, J., Ordóñez, G., Randles, S., Walhout, B. y Lindner, R. (2015). *Responsibility Navigator*. Karlsruhe (Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI)).
- Kuraj, N. (2017). *REACHing an environmental regulation for nanotechnology. An analysis of REACH as an instrument for preventing and reducing the environmental impacts of nanomaterials*. PhD Thesis, Faculty of Law, University of Oslo, Noruega. 451 pp.
- López, M., y Paoli, A. (2009). Ética para nanomedicina: primera propuesta para la elaboración de un código. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 2(2): 27-42. UNAM, México.
- Luna, G. (2017). Red Temática Conacyt de Nanociencia y Nanotecnología. Presentación. Reunión Nacional de Redes temáticas, 30 de agosto, 2017.
- Lungu, M., Neculae A, Bunoiu M, Biris C. (eds.). (2015). *Nanoparticles' promises and risks. Characterization, manipulation, and potential hazards to humanity and the environment*. Springer, 359 pp.
- National Nanotechnology Initiative (NNI). (2019). *National Nanotechnology Initiative Supplement to the president's budget for fiscal year 2020*. NSTC-COT y NSET.
- NanoSafety Cluster (NSC). (2017). *NanoSafety Cluster Research Regulatory Roadmap*.
- Parlamento Europeo (PE). (2008). *Informe sobre los aspectos reglamentarios de los nanomateriales*. Parlamento Europeo, Comisión de Medio Ambiente, Salud Pública y Seguridad Alimentaria.
- Ponce del Castillo, Aida / ETUI. (2010). *The EU approach to regulating nanotechnology*. Bruselas. 45 pp.
- PROSAFE. (2017). *The ProSafe White Paper. Towards a more effective and efficient governance and regulation of nanomaterials*.
- Rip, A. (2014). The past and future of RRI. *Life Sciences, Society and Policy*, 10(17). <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0017-4>
- RIVM. (2009). *Exposure to nanomaterials in consumer products*. National Institute for Public Health and the Environment.
- Red Nanociencia y Nanotecnología (RNyN). 2012). *Iniciativa para el desarrollo de la NT en México*. Memoria.
- RNyN. (2015). *Plan Nacional para la Nanoseguridad en México*. Red Temática de Nanociencia y Nanotecnología. Abril 30, 2015.
- Royal Society, Royal Academy of Engineering (RS y RAE). (2004). *Nanoscience and*

- nanotechnologies: opportunities and uncertainties*. Cardiff, UK.
- SCENIHR. (2010). *Scientific basis for the definition of the term “nanomaterial”*. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk, Health & Consumer Protection Directorate General. European Commission.
- Saldívar, L. (2019a). Regulando la nanotecnología. *Mundo nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 12(22): 1e-21e, UNAM, México. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.63140>
- Saldívar, L. (2019b). *Regulando lo invisible. Necesidad del principio de precaución en la política de nanotecnología en México*. Ciudad de México, México: El Colegio de México. 310 pp.
- Saldívar, L. (2020) Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional para la nanotecnología. *Mundo nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13(24): 1e-27e. UNAM, México. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>
- Secretaría de Economía (SE). (2012). *Lineamientos para regulaciones sobre nanotecnologías para impulsar la competitividad y proteger al medioambiente, la salud y la seguridad de los consumidores*.
- SEMARNAT-INE. (2012). *Inventario Nacional de Sustancias Químicas. Base 2009*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.
- Som, C., Wick, P., Krug, H. y Nowack, B. (2011). Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environment International*, 37: 1131-1142.
- Springer Nature. (2018). *Small science in big China*. National Center for Nanoscience and Technology and the National Science Library of the Chinese Academy of Science. Springer Nature.
- STOA. (2012). *NanoSafety – risk governance of manufactured nanoparticles. Final report, Science and Technology Options Assessment (STOA)*. European Parliament. Fleischer To. 129 pp.
- Swiss, Re. (2004). *Nanotechnology small matter, many unknowns*.
- Tickner, J. (2002). Un mapa hacia la toma de decisiones precautorias. En Jorge R. y Joel T. (coords.), *El principio de precaución en medio ambiente y salud pública: de las definiciones a la práctica*. Barcelona: Icaria, 41-82.
- Weiss. (2020). Toward nanotechnology-enabled approaches against the Covid-19 pandemic. *ASCNano*, 14, 6383-6406.
- Wickson, F., Gillund, F. y Myhr, A. (2010). Treating nanoparticles with precaution: Recognising qualitative uncertainty in scientific risk assessment. En P. S. Publishing (ed.), *Nano meets macro: social perspectives on nanoscale sciences and technologies*, 445-472.
- World Health Organization (WHO). (2017). *WHO guidelines on protecting workers from potential risks of manufactured nanomaterials*. 83 pp. ISBN 978-92-4-155004-8
- Zanella, R., Delgado, G. C. y Contreras, O. (2016). Catálogo nacional de instituciones de investigación con actividades en nanociencias y nanotecnología. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 9(16 y 17). UNAM, México.

Nanotecnología en la periferia: los casos de Costa Rica, Uruguay y Venezuela

Nanotechnology on the periphery: the cases of Costa Rica, Uruguay and Venezuela

Adriana Chiancone,*[†] María Sonsiré López,** José Roberto Vega Baudrit***

ABSTRACT: This paper addresses nanotechnology developments in three Latin American countries: Costa Rica, Uruguay and Venezuela. It aims both to characterize the field in these countries and to develop a first comparative approach. The methodology adopted included documentary analysis and analysis of specialized databases, mainly the StatNano database. The article describes and compares the incorporation of nanotechnology in the public agenda and policies; policy instruments, financing, governance and nanosecurity. Moreover, research and development (R&D) activities are characterized in terms of scientific production and technological innovation. The results of the study showed that the last two decades have been the time frame of a process of increasing institutionalization and internationalization of nanotechnology in this group of countries, where this field has primarily followed national patterns but faces common challenges.

KEYWORDS: nanotechnology, international comparison, Costa Rica, Uruguay, Venezuela.

RESUMEN: Este trabajo aborda la situación actual de la nanotecnología en tres países latinoamericanos: Costa Rica, Uruguay y Venezuela. Se busca caracterizar el trabajo en este campo en esos países y desarrollar una primera aproximación de carácter comparativo. La metodología adoptada incluyó revisión documental y análisis de bases de datos especializadas, fundamentalmente la base StatNano. El artículo describe y compara en los tres países la incorporación de la nanotecnología en la agenda y en las políticas públicas; instrumentos de política, financiamiento, gobernanza y nanoseguridad. Se caracterizaron, asimismo, las actividades de investigación y desarrollo (I+D) en términos de producción científica y de innovación tecnológica. Del estudio realizado surge que las últimas dos décadas han sido el marco temporal de un proceso de creciente institucionalización e internacionalización en el área de la nanotecnología en los países considerados, en los cuales el desarrollo de este campo ha seguido fundamentalmente pautas nacionales, pero enfrenta desafíos comunes.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, comparación internacional, Costa Rica, Uruguay, Venezuela.

Introducción

En este artículo se aborda la situación de las nanociencias y las nanotecnologías (a las que nos referiremos a lo largo de este trabajo como nanotecnología)

Recibido: 7 de junio 2021.

Aceptado: 31 de julio 2021.

Publicado: 25 de agosto 2021.

* Universidad de la República, Uruguay.

** Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela.

*** LANOTEC, Centro Nacional de Alta Tecnología, Costa Rica.

[†] Autora de correspondencia: achiancouniversidad@gmail.com

en tres países latinoamericanos: Costa Rica, Uruguay y Venezuela. En el título del artículo, hemos empleado la expresión ‘nanotecnología **en** la periferia’, aludiendo a los cambios en las interpretaciones de la dinámica centro-periferia.

El concepto “ciencia periférica” ha sido ampliamente utilizado para dar cuenta de los procesos de producción y apropiación de conocimiento, y de las relaciones entre “centro” y “periferia”. En el contexto de revisiones y problematizaciones de esta noción, se ha destacado su carácter ahistórico y estático, así como también las limitaciones de su capacidad explicativa. Esto ha llevado a pasar de enfoques que consideran la pertenencia al “centro” o a la “periferia” como factores explicativos, a otros donde estos conceptos son interpretados como consecuencia de procesos relacionales creados y reproducidos tanto social como cognitivamente (Matharan, 2017: 37-40).

Un concepto alternativo como el de “ciencia en la periferia”, planteado por Marcos Cueto (1989), implica que “el trabajo científico en estos países tiene sus propias reglas, que deben ser entendidas no como síntomas de atraso o modernidad, sino como parte de su propia cultura y de las interacciones con la ciencia internacional” (Cueto, 1989: 29). A diferencia del concepto “ciencia periférica”, el concepto de ciencia **en** la periferia permite visualizar la heterogeneidad al interior de las particulares comunidades científicas, así como entre varias comunidades científicas ubicadas en contextos con notorias diferencias (Kreimer, 2010: 44)

Con la creciente interconexión global aumenta la diferenciación en las relaciones centro-periferia (Hanners, 2015). Como en otros campos del conocimiento, existe heterogeneidad en los desarrollos de la nanotecnología en América Latina, y pueden observarse importantes diferencias entre los países y al interior de estos.

La investigación en nanotecnología y la focalización en temas distintos han sido configuradas por la diferentes formas de inserción en las redes internacionales, regionales o nacionales. A su vez, el grado de desarrollo de la estructura de investigación y recursos humanos condiciona las formas de inserción en esas redes. En la medida en que la distribución en la región de esas estructuras y recursos es desigual, los países de mayor tamaño están generando mayores capacidades autónomas (Invernizzi, Hubert y Vinck, 2014: 19).

Brasil, México y Argentina, que se destacan ampliamente en nanotecnología en términos de capacidades instaladas, recursos humanos, financiamiento, así como de visibilidad de sus actividades de investigación y desarrollo (I+D), son precisamente los países latinoamericanos más estudiados, más allá de la producción regular de trabajos sobre diferentes aspectos de la nanotecnología en la región (Foladori e Invernizzi, 2008 y 2013; Foladori *et al.*, 2012 y 2016; RICYT, 2008; Kay y Shapiro, 2009; entre otros).

En este contexto conceptual, cabe preguntarse cuál es la situación en países con menores posibilidades en la nanotecnología, un campo que requiere de equipamiento e infraestructura de alto costo, así como de recursos humanos altamente capacitados, y donde, consecuentemente, existe una

gran dependencia del financiamiento y de las posibilidades de acceso a instrumentos y personal idóneos.

En este artículo se busca caracterizar el trabajo en nanotecnología en Costa Rica, Uruguay y Venezuela y desarrollar una primera aproximación de carácter comparativo.

La comparación de sus respectivos desarrollos en este campo y de algunos productos científicos y de innovación, permite identificar similitudes y diferencias entre sus dinámicas de creación y cambio, así como identificar factores que se asocian con dicha heterogeneidad.

El trabajo se estructura en cuatro secciones. La primera presenta los aspectos metodológicos del estudio. En la segunda se ubica la situación de la nanotecnología en cada país, en el marco del desarrollo más general de la ciencia, tecnología e innovación (CTI). Las características de los países en cada uno de los ejes elegidos para la comparación son expuestas en la tercera sección. El artículo se cierra con una sección de discusión.

Aspectos metodológicos

La perspectiva comparativa recae sobre tres países latinoamericanos que no pertenecen al grupo de los de mayor tamaño y mejores resultados en la región. En Centro y Sudamérica, respectivamente, Costa Rica y Uruguay presentan dimensiones que los vuelven casos especialmente comparables. Un desarrollo económico y social relativamente temprano, la consolidación de una institucionalidad democrática estable, y extensiones territoriales y poblacionales semejantes. También las inversiones en I+D como porcentaje del PBI son similares para Costa Rica y Uruguay, con valores de 0.43% y 0.41%, respectivamente, en 2016 - (StatNano). Venezuela, en cambio, es un caso especial e interesante pues si bien tenía una menor inversión en I+D como porcentaje del PBI - 0.12% en 2016 - (StatNano), su productividad científica en los años ochenta del siglo pasado era comparable a la de los países de la región de mayor desarrollo relativo como México, Brasil y Argentina (Mercado *et al.*, 2020: 16). Por otro lado, son similares en términos del PBI per cápita (en dólares constantes de 2010). En 2020, el valor de ese indicador era de 9,619.7 para Costa Rica y 13,430.7 para Uruguay; el último valor disponible para Venezuela, en 2014, era de 14,026.4 (World Bank, s/f). Por lo tanto, hemos integrado a Venezuela a la comparación con los dos países antes citados.

Las técnicas empleadas para la recolección de datos fueron la revisión de literatura científica, de informes de agencias nacionales y documentos de política, además de la base StatNano, especializada en nanotecnología. Hemos identificado algunos factores cuya descripción y análisis permitieron una comparación de: a) diseño de políticas, y, b) actividades de I+D.

Para la primera parte hemos utilizado los ejes: a.1) instrumentos de política y financiamiento; a.2) gobernanza y nanoseguridad.

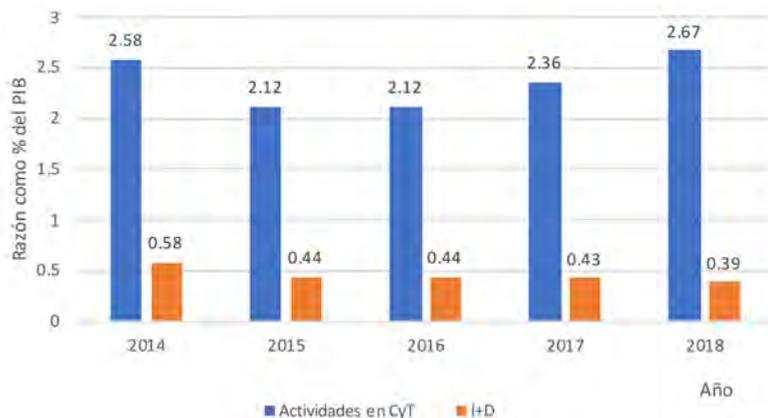
Para la segunda, hemos empleado algunos indicadores¹ de StatNano (presentados entre paréntesis), para los siguientes ejes: b.1) producción científica (publicaciones relacionadas con nanotecnología; prioridad nacional de la nanociencia); b.2) visibilidad de la producción científica (proporción de publicaciones de nanotecnología en Q1 y proporción del 10% superior de artículos del Q1; promedio de citas por artículo de nanotecnología); b.3) colaboración internacional (proporción de colaboración internacional en nanociencia); b.4) desempeño industrial (patentes de nanotecnología concedidas, en las oficinas de patentes europea – EPO, o de Estados Unidos -USPTO).

Panorama de CTI y nanotecnología en los tres países

CTI en Costa Rica

La CTI en Costa Rica se encuentra representada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) y el Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT). La inversión total de fondos para la investigación en I+D es baja. Para 2020 fue de apenas 13.5 millones de dólares, siendo MICITT el segundo ministerio con el menor presupuesto para ese año. Este resultado se explica por una reducción de inversión en I+D por parte del sector académico, específicamente en la asignación de recursos para el desarrollo de proyectos de I+D. En 2018, el país invirtió el 2.67% del PIB en actividades de ciencia y tecnología (CyT), con un incremento del 0.31% respecto al 2017, lo que representaba el 0.39% del PIB en I+D (gráfica 1).

Gráfica 1. Inversión en actividades de CyT y en I+D en Costa Rica (2014-2018).



Fuente: MICITT/CONICIT, 2018.

¹ Cabe destacar que evaluar la I+D regional a lo largo del tiempo, a través de la medición de los artículos publicados en las revistas de mayor reconocimiento internacional, disponibles en plataformas de información científica como *Web of Science* y *Scopus*, en nanotecnología no presenta las dificultades de otros campos del conocimiento, cuyos investigadores eligen publicar en el medio local (RICYT, 2008).

Nanotecnología en Costa Rica

Como respuesta al fenómeno mundial de la nanotecnología, en el año 1999 se concretó la creación del Centro Nacional de Alta Tecnología (CENAT), un órgano interuniversitario especializado en el desarrollo de investigaciones y posgrados en áreas de alta tecnología y de proyectos de vinculación e innovación tecnológica con el sector gubernamental y empresarial. CENAT fue creado al amparo del Convenio de Coordinación de la Educación Superior Universitaria Estatal, en la sesión del Consejo Nacional de Rectores (CONARE), número 5-99 de ese año. El objetivo primordial de CENAT es ejecutar actividades de capacitación, de investigación y servicios en ciencia y tecnología en varias áreas estratégicas y programas que permitan proveer al país de la tecnología pertinente para un desarrollo competitivo de los diferentes sectores de la sociedad en el ámbito económico, social y ambiental. Entre esas áreas estratégicas se encuentra el Área de Ciencia e Ingeniería de los Materiales y miniaturización de sensores, en la que con el apoyo de diversos sectores del país, MICITT, CONARE, CENAT y la industria de alta tecnología, así como de instituciones internacionales como la NASA, el 31 de agosto del año 2004, se inauguró el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) e inició labores de investigación el 18 de octubre del mismo año. LANOTEC fortaleció al país en investigación científica, brindándole la capacidad de ser el líder tecnológico en la región centroamericana y del Caribe, con ingeniería de punta en el estudio de materiales avanzados para la investigación, diseño y entrenamiento en tecnologías asociadas con la microtecnología, nanotecnología y ciencia de los materiales. Permitió además, ampliar el desarrollo de conocimiento y colaborar con formación de capital humano y la investigación científica en esta área. También contribuyó a desarrollar aplicaciones específicas para el sector productivo en diferentes tipos de industrias como la metalúrgica, la de los materiales, la de los polímeros, para la microbiología, la medicina, la geofísica y la exploración espacial, entre otras. Estos conocimientos y futuras innovaciones en diversas aplicaciones tienen un gran potencial comercial y de desarrollo económico para el país y sus colaboradores. Considerando lo anterior, este laboratorio, como un ente que proyecta su liderazgo en la región, debería poseer un norte dirigido hacia seis nodos temáticos que incluyen la investigación, la extensión, la docencia, acciones en innovación y emprendedurismo, el deporte y el arte. En la tabla 1 se presentan algunas de las áreas de trabajo que se desarrollan en el nodo de investigación. Todo esto se complementa con una Unidad de Prestación de Servicios, que brinda apoyo técnico-científico a las empresas que así lo requieran.

LANOTEC cuenta con una inversión de más de 8 millones de dólares en equipamiento, incluyendo microscopios SEM y TEM, así como de AFM.

A continuación, se resumen el nacimiento y desarrollo de la nanotecnología en Costa Rica:

- 2004 – Creación de LANOTEC.

- Se incluyen la bio y la nanotecnología como pilares de desarrollo nacional en la Estrategia del Siglo XXI.
- 2011– Decreto N.º 36567-MICITT: “Declaratoria de interés público de la investigación en nanotecnología y sus aplicaciones”.
- Existencia de programas y redes universitarias de CONARE: POLIUNA, CICIMA.
- Incorporación de LANOTEC a la Secretaría Técnica para la Gestión de Sustancias Químicas: Comisión de Nanotecnología: MS, MINAE, CONARE.
- Creación del Comité de Productos Químicos y Biotecnología de OCDE Costa Rica.
- 2013 – Creación del Programa Nacional de Desarrollo, PNDN.
- 2016 – Cofundación del Clúster Costarricense de Biotecnología, Dispositivos Médicos y Ciencias de la Vida, CRBiomed.
- 2016 – Incorporación de LANOTEC A ILSI Mesoamérica. En la actualidad tiene la presidencia.

Tabla1. Nodos de trabajo en LANOTEC-CENAT.

Número	Nodo	Temas	Objetivo
1	LANOTEC FABLAB	Procesos de innovación	Procesos de innovación
2	Biorrefinería y economía circular	Bioeconomía Biorrefinería: biomasa, energía. Materiales, nanomateriales, polímeros y plásticos, composites.	Procesos de innovación
3	Nanobiodiversidad	Nanobiotecnología y nanobiomimetismo	Procesos de innovación
4	Ciencias de la vida	Nanomedicina, dispositivos médicos, Farmacia Proyectos de alta tecnología: IoT, IoMT	Procesos de innovación
5	Vocaciones científicas	Nanoprofesor, OLCOQUIM, OLCOCI	Procesos de innovación
6	Regulación e impacto en la sociedad	Acreditación ISO 17025 Nanometrología, patrones de referencia. Normalización, seguridad laboral. Aspectos regulatorios, OCDE.	Procesos de innovación

Fuente: Elaboración propia, 2016.

- 2019 – Creación del CTN 060 de Nanotecnología de INTECO.
- Participación en la creación de la Estrategia Nacional de Bioeconomía 2020-2030.

CTI en Uruguay

A partir del año 2007, Uruguay puede ser caracterizado por la definición de políticas públicas, planes e instrumentos para el desarrollo de la CTI. En un contexto de crecimiento económico, se crearon nuevas estrategias para el estímulo de la investigación y la innovación en el país con un cierto nivel de asignación de recursos por parte del Estado uruguayo, los que se suman al aporte, en menor proporción, del sector privado. La evolución de los valores de la inversión en I+D como porcentaje del PBI en el periodo 2009-2018 (tabla 2), indica que en Uruguay esta inversión no se ha mantenido constante. Este gasto está atrasado en comparación regional e internacional (RICYT, 2020). Por otro lado, la participación del sector privado no llegaba en el año 2015, a una cuarta parte de la inversión (ANII, 2017: 15).

En Uruguay las actividades de I+D se realizan mayoritariamente en el sector público, en la Universidad de la República (UDELAR), el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE).

Tabla 2. Inversión de Uruguay en I+D como porcentaje del PBI (2009-2018).

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
I+D/ PBI (%)	0.41%	0.34%	0.35%	0.33%	0.32%	0.34%	0.36%	0.41%	0.49%	0.42%

Fuente: Elaboración propia con base en RICYT, 2020.

Uruguay contaba en el año 2018 con 2,402 investigadores, 67.2% de los cuales tenía un doctorado. A pesar de esto, para desarrollar un modelo competitivo, de diferenciación y diversificación, que agregue valor y conocimiento a la economía tradicional, es necesario un cambio de tendencia que conduzca a aumentar el número de investigadores, por lo menos al triple (Pohl Consulting y Asoc., 2016). Es débil la relación entre academia y sector productivo, así como también entre oferta de instrumentos y demandas de innovación basadas en ciencia y tecnología.

Nanotecnología en Uruguay

En el año 2009 el gobierno uruguayo, como ya lo habían hecho otros muchos países de la región, incluyó la nanotecnología como área transversal prioritaria en su programa estratégico de ciencia, tecnología e innovación (CTI). Previamente a esta definición de política pública, un conjunto de diecisiete investiga-

dores locales había creado, en el 2006, el grupo G-Nanotec-Uy que integraba los distintos equipos que ya habían iniciado actividades de I+D en el país. Estos grupos pertenecían a UDELAR, a excepción de un equipo del IIBCE (Chiancone, 2012).

A partir de esa situación inicial, surgieron nuevos grupos y comenzó a desarrollarse I+D en otras instituciones. Entre ellas, el Instituto Pasteur de Montevideo (IPMO), inaugurado a fines de 2006; el Grupo de Tecnología de Proteínas del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad ORT Uruguay, creado en el 2010, y, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).

Por otro lado, nuevas líneas de trabajo se agregaron a las iniciales, fundamentalmente en áreas como salud y energía. El proceso de diversificación ha estado asociado con la colaboración interinstitucional en proyectos, además a un fuerte relacionamiento internacional de los investigadores.

Un evento altamente reconocido y difundido ha sido el establecimiento de la “primera unidad de investigación especializada en nanotecnología del país”. NanoMat, el laboratorio de nanotecnología del Polo Tecnológico de Pando (PTP) fue creado con el apoyo del programa Uruguay Innova, donación de la Unión Europea. Esos fondos y los recursos de un proyecto ANII permitieron la adquisición de equipo científico tecnológico. El Instituto PTP es desde el año 2012 una Unidad Académica de la Facultad de Química de UDELAR, dedicada a la investigación, desarrollo e innovación, en química, biotecnología, ciencias de los materiales y medio ambiente. Su especificidad radica en estar orientada desde su origen por la demanda del sector productivo de bienes y servicios, tanto privado como público (Polo Tecnológico, s/f).

La necesidad de formar recursos humanos altamente capacitados en nanotecnología ha estado presente desde las primeras etapas, en las consideraciones de los investigadores uruguayos. Esta inquietud se ha concretado en una propuesta de maestría en nanociencia y ciencia de materiales del Programa de Desarrollo de Ciencias Básicas (PEDECIBA), aprobada en 2018.

CTI en Venezuela

Desde inicios de este siglo, el sistema venezolano de CTI se ha visto seriamente afectado por las políticas en esa materia. A grandes rasgos estas políticas podrían caracterizarse como un intento del Estado por ejercer mayor control político sobre las universidades e institutos de investigación, lo cual ha generado fuertes tensiones políticas a partir del año 2002, resultando en la creación de una estructura paralela para la educación superior y lo que algunos autores han calificado como una “asfixia presupuestaria” a las universidades (Mercado *et al.*, 2020: 24).

Esta situación empeoró considerablemente debido al fenómeno de hiperinflación que experimenta el país desde 2015, lo cual ha profundizado el colapso de la universidad pública venezolana. Como resultado, la inversión en CTI se ha visto drásticamente reducida. De acuerdo con datos oficiales del Observatorio Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación (ONCTI), del total

del presupuesto anual que asigna el Ejecutivo a instituciones de educación superior, el porcentaje destinado a investigación no llega siquiera al 10% en el mejor de los casos.

Otra consecuencia de la crisis es la pérdida de capacidades nacionales para CTI. La pérdida real de talento humano es difícil de estimar debido a la falta de cifras oficiales confiables, aunado a que muchos investigadores han solicitado jubilaciones anticipadas y permisos no remunerados, como una estrategia para intentar ubicarse en otros espacios con mejores retribuciones. Se estima que en los últimos 18 años emigraron 2,084 investigadores, la mayoría de los cuales lo hizo después de 2014 (Diez *et al.*, 2020).

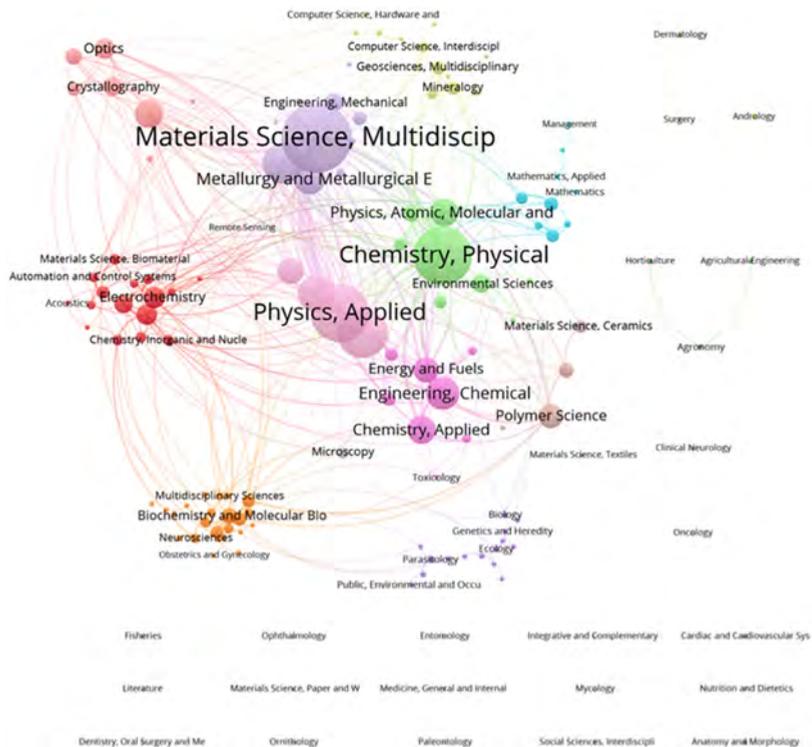
En Venezuela, la relación entre academia y sector productivo ha estado históricamente asociada con la prestación de servicios. Sin embargo, en los últimos años la capacidad de las instituciones de prestar estos servicios se ha visto disminuida, mientras que el sector productivo también registra una disminución de sus demandas de análisis y asistencia técnica hacia las universidades. En general, la situación actual del sistema nacional de CTI implica la pérdida de talento humano; obsolescencia de equipos, falta de materiales y suministros para la investigación; cierre de programas de posgrado y becas, deterioro de infraestructura, etcétera.

Nanotecnología en Venezuela

Venezuela no tiene una política pública específica para la nanotecnología, pero en las últimas dos décadas se han llevado adelante algunas iniciativas que favorecieron su desarrollo. En el año 2005, el Estado lanzó el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PNCTI 2005-2030), que reconoce explícitamente la importancia de la nanotecnología, pero no la incluye en la agenda de prioridades de investigación. En el año 2009, la Red Venezolana de Nanotecnología (RedVnano) presentó al entonces Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias, una propuesta de Plan Nacional de Nanotecnología a 10 años, estructurado a partir de una alianza Red-Gobierno, con objetivos comunes para fortalecer el desarrollo endógeno y sustentable.

Cuatro instituciones son responsables de más del 80% de las publicaciones científicas en el campo nano: el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC) (27%), Universidad Central de Venezuela (UCV) (22%), Universidad Simón Bolívar (USB) (21%) y Universidad de Los Andes (ULA) (16%) (López *et al.*, 2015: 114). En cuanto a líneas de investigación, un análisis de las estructuras disciplinarias de las publicaciones de nanotecnología venezolanas entre 1975 y 2018 (figura 1), identificó que ciencias de materiales es el área predominante en todo el periodo, así como fisicoquímica, química analítica, fisicomatemáticas, bioquímica y biología molecular. En los últimos veinte años observamos nuevas áreas disciplinarias como las ingenierías, con una diversidad de aplicaciones en las áreas química, biomédica, materiales, entre otras (López *et al.*, 2020).

Figura 1. Estructura disciplinaria de las publicaciones en nanociencia y nanotecnología en Venezuela (1975-2018).



Fuente: López *et al.* 2020.

Según los datos obtenidos por la RedVnano para el año 2015, la mayoría de los equipos se encuentran en las principales instituciones académicas y algunos en la industria, concentrándose geográficamente en las ciudades de Caracas, Mérida, Maracaibo, Cumaná y Puerto Ordaz (López *et al.*, 2015). La infraestructura disponible para nanocaracterización y nanofabricación incluye equipos para análisis químicos, tamaño de partícula y recubrimientos nanoestructurados, microscopios de sonda de barrido, SEM, TEM, difracción de rayos X, RMN, entre otros. Actualmente es difícil conocer las condiciones de operatividad de estos equipos, debido a la falta de presupuesto para su mantenimiento o incluso la disponibilidad de técnicos especializados en su manejo en las instituciones en las que se encuentran.

En cuanto a recursos humanos, los únicos datos disponibles son los recabados por la RedVnano. Para el momento de su creación la red agrupaba 106 miembros y ya para el año 2015 —fecha del último reporte— había alcanzado los 473 integrantes. Los cuales contaban con diferentes grados de formación académica y pertenecían a diversas instituciones principalmente

públicas tanto del ámbito académico, como del ámbito productivo (Siderúrgica del Orinoco Alfredo Maneiro, Corporación Venezolana de Guayana y Petróleos de Venezuela); así como también del sector militar (Dirección de Tecnologías de Información y las comunicaciones del Ejército).

Revisión comparativa

Diseño de políticas

Instrumentos de política y financiamiento

La mayoría de los fondos empleados para I+D en nanotecnología en Costa Rica provienen de los Fondos para la Educación Estatal Superior (FEES), provenientes de las universidades estatales. Un bajo porcentaje de proyectos de este campo corresponde a los aprobados por el MICITT y el CONICIT, así como a iniciativas privadas, especialmente en el sector de ciencias de la vida, alimentos y de materiales.

El comienzo de muchas de las líneas de investigación en nanotecnología en Uruguay fue sin financiamiento específico; investigadores guiados por su interés y consideraciones sobre los potenciales desarrollos. Sin embargo, la condición de área estratégica transversal atribuida posteriormente en el PENCTI brindó a las actividades de I+D, así como a la formación en nanotecnología, ciertas posibilidades de financiamiento. A estas se sumaron las diferentes convocatorias por fondos sectoriales (salud, energía) de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y otras organizaciones (Chiancone, 2012). UDELAR, a través de las convocatorias de la Comisión de Investigación Científica (CSIC), representa otra fuente de recursos nacionales en los que participan los nanotecnólogos uruguayos.

Tampoco en Venezuela existe una política oficial en materia de nanotecnología. Sin embargo, el Estado ha financiado y acompañado varias iniciativas surgidas desde la RedVnano. Entre los convenios más importantes encontramos el Programa de Cooperación de Postgrados (PCP) y el programa PREFALC NANO2, que cofinanciaron la movilidad de estudiantes e investigadores entre Venezuela y países como Francia, Argentina y Brasil. El convenio Cuba-Venezuela en su apartado sobre ciencia y tecnología financió no solo actividades de formación sino también proyectos de investigación (López *et al.*, 2015).

En el año 2014, se llevó a cabo el Foro NanoSur con un fuerte apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Mincyt). El evento reunió investigadores, representantes oficiales y del sector productivo tanto de Venezuela, como de varios países de América Latina, Europa y nuevos aliados políticos como Irán. El objetivo del Foro era impulsar la creación de la Comunidad de Nanotecnología del MERCOSUR (NanoSur), una propuesta que presentó Venezuela en el marco de la Reunión Especializada en Ciencia y Tecnología del MERCOSUR (RECyT) del año 2013, para promover la cooperación regional en el área. Sin embargo, esta propuesta tampoco prosperó en el seno de la organización.

En cuanto al financiamiento, la mayor parte de las actividades de investigación se realizan con financiamiento público, a través del presupuesto or-

dinario de las instituciones y de convocatorias generales de Mincyt. La Red NANOANDES genera cada año una escuela de nanotecnología a nivel latinoamericano, con fuerte participación de Francia, además de Costa Rica, Brasil, México, Argentina, Perú, Ecuador, Bolivia, entre otros países.

Gobernanza y nanoseguridad

En la actualidad, LANOTEC está siendo acreditado en las Normas ISO 17025-2017 con el fin de cumplir con todos los requerimientos que exigen las empresas del sector de ciencias de la vida. Asimismo, desde hace cuatro años se inició un proceso de normalización de la nanotecnología en Costa Rica, junto con el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO). Otro objetivo para el 2021, es poder ser parte del Comité Técnico en Nanotecnología de la Organización Internacional de Estandarización, el ISO/TC-229, y continuar el proceso de establecer regulaciones de la nanotecnología en Costa Rica. Como parte de la incorporación de Costa Rica a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), LANOTEC fue invitado a formar parte del Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN), para colaborar con el Comité de Productos Químicos y Biotecnología de OCDE Costa Rica. También para promover la cooperación internacional en los aspectos de salud humana y seguridad ambiental de los nanomateriales manufacturados, y otros materiales avanzados para la reglamentación, considerando esquemas de gestión voluntarios, legislativos o de otro tipo. Se espera trabajar en los seis tipos más comunes de formas voluntarias de vigilancia de la nanotecnología, conocidas como “regulación blanda”: registros, etiquetado, códigos de conducta, sistemas de manejo de riesgo, guías y estándares técnicos.

En Uruguay se ha desarrollado un conjunto de reuniones, cursos, talleres de difusión sobre nanotecnología y los aspectos éticos, legales y sociales (ELSA), así como de los potenciales riesgos para la salud y el ambiente. En 2012, el país participó voluntariamente junto a Nigeria y Tailandia, en un proyecto piloto del Instituto de las Naciones Unidas para la Formación Profesional y la Investigación (UNITAR) sobre la seguridad en la gestión de productos de nanotecnología. Entre los elementos identificados sobre la nanoseguridad en Uruguay, se encontraba la escasa visibilidad del tema; debilidades en el manejo de sustancias químicas; necesidad de incorporar los aspectos ELSA; y requerimientos de equipamiento y personal calificado (Chiancone y Martínez Larrechea, 2015).

La subcomisión de nanometrología y nanoseguridad del Consejo Sectorial de Nanotecnología (del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM)) estableció un conjunto de objetivos que incluyen:

- El estímulo a la capacitación de personal técnico y formación de nuevos doctorandos en el área.
- La organización de recursos materiales y humanos para implementar los protocolos en Uruguay.

- La realización de ejercicios de ensayos de aptitud entre laboratorios nacionales, y la participación en estos ejercicios con países de la región.
- El fomento de regulaciones de productos que contengan material nanoparticulado (registro, etiquetado, advertencias, composición y contenido).
- La armonización de técnicas en el ámbito del MERCOSUR y con otros bloques comerciales (Méndez, 2015).

En ese contexto se desarrolla el trabajo de nanometrología del grupo del Laboratorio de Biomateriales, de la Facultad de Ciencias (UDELAR) y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (con rol, entre otros, de Instituto Metroológico Nacional). Este trabajo cuenta con el apoyo de instituciones como el MIEM, la CSIC (UDELAR), la ANII, y el PEDECIBA.

En el área de gobernanza, en Venezuela se han logrado tímidos avances con la realización de mesas de trabajos, reuniones y eventos con el sector petrolero, metalúrgico y agroalimentario. Además, se han realizado reuniones y talleres con representantes del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel (INHRR) y el Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos (Sencamer), organismos públicos encargados de la regulación y control de diversos productos, bienes y servicios (López *et al.*, 2020).

Entre 2014 y 2015 se desarrolló un proyecto bilateral en el marco del Convenio Cuba-Venezuela para avanzar en reglamentos, metrología y nanotoxicología en el área de salud en ambos países, cuyo producto más importante fue el primer documento regulatorio sobre la comercialización de productos farmacéuticos con nanotecnología en Venezuela. Se trata de una circular emitida por INHRR, donde se establece que todas las especialidades farmacéuticas que contengan nanotecnología se consideran productos nuevos para efectos de su evaluación y registro sanitario nacional.

Actividades de I+D

Producción científica

Publicaciones relacionadas con nanotecnología

La gráfica 2 permite comparar la evolución del número de artículos relacionados con nanotecnología, indexados en la *Web of Science* entre 2012 y el primer semestre 2021. La evolución de las publicaciones de los tres países en la última década presenta desempeños muy diferentes. Mientras que en el año 2012 Venezuela lideraba con 55 artículos, frente a 31 de Uruguay y 8 de Costa Rica, en 2020 (y desde 2017) el liderazgo le corresponde a Uruguay, con 72 artículos, mientras que Venezuela registraba 51 y Costa Rica 36. Esa tendencia se mantiene en el primer semestre de 2021.

El aumento de la capacidad de publicar y el número de las publicaciones de Costa Rica está asociado con distintos factores. En primer lugar, LANOTEC (el

Gráfica 2. Publicaciones relacionadas con nanotecnología (artículos).



Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 a).

laboratorio de mayor capacidad en el país) aumentó durante ese periodo, la cantidad de equipos de alta tecnología para realizar caracterización. Entre esos equipos se encuentran los microscopios electrónicos de barrido (SEM) y de transmisión (TEM), lo cual redundó en una mayor calidad de las publicaciones e impulsó a LANOTEC a generar alianzas estratégicas y de colaboración.

Por otro lado, en LANOTEC también se dio un aumento de recursos humanos con un mayor grado académico. En el año 2021, el 90% de los investigadores y colaboradores tienen el doctorado, con una formación básica en diversas áreas de las ciencias naturales y experimentales, así como en las ingenierías.

También en el caso de Uruguay, se ha dado un crecimiento del número de publicaciones indexadas, alcanzándose en el primer semestre de 2021, la misma cantidad de artículos que en todo el año 2015. Diversos factores apoyaron el desarrollo del campo de la nanotecnología en el país, que explicaría dicho aumento. Entre ellos, el proceso de consolidación y diversificación temática de los grupos de I+D en las distintas instituciones (UDELAR, PTP, ORT, IPMO y LATU), el acceso a fondos a través de las convocatorias locales y la cooperación internacional, con los consecuentes progresos en la formación de recursos humanos y la adquisición de equipamiento científico. Las colaboraciones científicas con investigadores de otros países aportan en la misma dirección.

En el caso de Venezuela, se observa que el ritmo de publicaciones es inestable en el periodo analizado, aunque se evidencia el mantenimiento de cierta capacidad para publicar, a pesar de los recortes en el financiamiento y los efectos negativos de la crisis que sufre el país desde el año 2015. Esto se puede explicar en parte por el alto grado de colaboración que caracteriza el campo, lo cual permite a los investigadores nacionales apoyarse en la infraestructura y demás recursos de sus colaboradores en el exterior.

Otro factor que contribuye positivamente a esta capacidad es que muchos investigadores han desarrollado estrategias para ubicarse en institutos de investigación en el exterior y así obtener financiamiento mediante diversas figuras, sin abandonar formalmente su institución de adscripción en Venezuela. Unas de las figuras más comunes son las estancias de investigación, permisos no remunerados y años sabáticos.

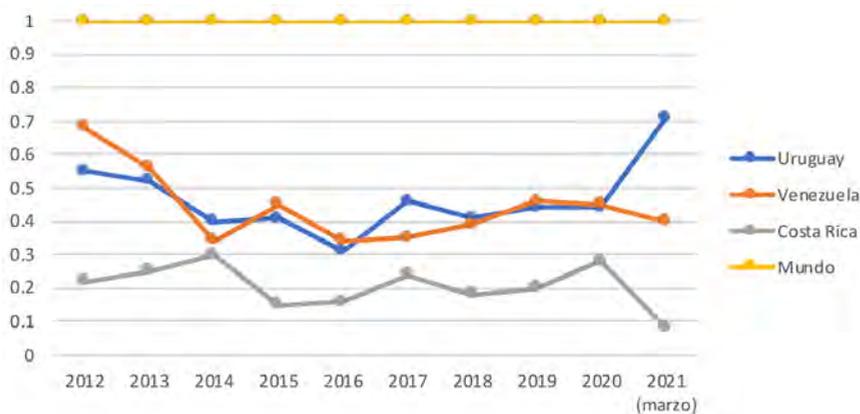
Prioridad nacional de la nanociencia

Es un indicador que mide la prioridad nacional de la nanociencia y muestra la concentración de actividades científicas en esta área del conocimiento en un país determinado. Se define como la relación entre el cociente de artículos de nanotecnología de un país sobre el total global de artículos de nanotecnología, y el cociente de los artículos del país sobre el total global de artículos en el mismo periodo. La región Mundo es la unidad (StatNano, 28/7/2021 b).

La gráfica 3 permite observar que en la evolución de la prioridad nacional de la nanociencia de cada país (entre 2012 y marzo 2021), Uruguay comenzó con un valor de 0.55 en 2012 y terminó con 0.71, con registros diferentes cada año. Venezuela, en cambio, pasó de 0.68 a 0.4 y Costa Rica partió de 0.17 en 2012 y alcanzó solo 0.08 en marzo de 2021. En resumen, la consideración de los valores del periodo muestra un cambio en las posiciones relativas de estos países, quedando al final Uruguay en primer lugar, en alza; Venezuela, en segundo lugar, a la baja y, por último, Costa Rica, parcialmente en alza, con picos en 2014, 2017 y 2020.

En marzo 2021, los valores del indicador para México, Brasil y Argentina eran 0.92, 0.73 y 0.64, respectivamente (StatNano 28/7/2021 b).

Gráfica 3. Prioridad nacional de la nanociencia.



Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 b).

Visibilidad de la producción científica Proporción de publicaciones de nanotecnología en Q1 y proporción del 10% superior de artículos del Q1

En la tabla 3 se presentan los valores de dos indicadores. Por un lado, la participación en las publicaciones de nanotecnología del Q1. Este indicador expresa como porcentaje para cada país, la proporción de artículos de nanotecnología publicados en las revistas del primer cuartil (Q1), en relación con el total de artículos de nanotecnología publicados (StatNano 28/7/2021 c).

Por otro lado, la proporción de artículos de nanotecnología publicados en el 10% de las revistas superiores, en relación con el total de artículos de nanotecnología publicados en revistas del primer cuartil (Q1) (basado en la magnitud del factor de impacto – JCR) – (StatNano 28/7/2021 d).

Tabla 3. Participación en revistas del Q1 (%) y en artículos del 10% superior del Q1, por año y por país (%).

País	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Costa Rica - Q1	40	58.33	33.33	16.67	35.00	40.91	41.67
Uruguay - Q1	54.29	29.55	39.47	42.86	36.07	42.86	33.33
Venezuela - Q1	56.67	42.37	32.61	25.00	28.57	33.96	27.45
Mundo - Q1							48.39
Costa Rica - 10% sup. Q1	16.67	42.86	20.00	25.00	28.57	33.33	26.67
Uruguay - 10% sup. Q1	23.32	15.38	13.33	18.52	18.18	20.00	25.00
Venezuela - 10% sup. Q1	35.29	16.00	20.00	15.38	14.29	16.67	7.14
Mundo - 10% sup. Q1							34.74

Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 c; 28/7/2021 d).

En cuanto al impacto y visibilidad de la producción de los tres países, revisando el primer cuartil, y en especial el 10% superior del primer cuartil, el liderazgo corresponde a Costa Rica. Su producción se destacó con el 58.33% en el Q1 en 2015, con una baja en 2017 (16.67%) y con 41.67% en 2020.

A pesar de que la mayoría de las publicaciones de Costa Rica no se encuentran en el 10% superior (tabla 3) muchas de estas están calificadas en el primer cuartil (Q1) de SCIMAGO, y este valor se ha ido incrementando conforme pasan los años, alcanzando un valor de 26.67 para 2020. Para el 2020, LANOTEC publicó 9 artículos en el primer cuartil (Q1), 11 artículos en el segundo cuartil (Q2), dos en el tercero (Q3) y 1 en el cuarto cuartil (Q4), y hasta abril del 2021, ya se han publicado 11 artículos, 8 de ellos en los dos primeros cuartiles (Q1 y Q2). Se espera que en 2021 este valor aumente, pues se han realizado publicaciones en el 10% de las revistas superiores de nanotecnología.

Por otro lado, Uruguay y Venezuela participaban en Q1 con un 54.29% y 56.67% en 2014, pero en 2020 estaban claramente por detrás de Costa Rica (41.67%), con 33.33% y 27.45%, respectivamente.

El valor de la participación en Q1 de los tres países es menor que el promedio mundial del año 2020 (48.39%). Sin embargo, las posiciones relativas de Costa Rica y Uruguay son superiores a la de México (con 32.22%); la de Costa Rica también está por encima de la posición de Brasil, con 38.14% (StatNano 28/7/2021c).

En relación con la participación en el 10% de revistas del primer cuartil, en 2014 Costa Rica presentaba el menor porcentaje (16.67%) y Venezuela, el mayor (35.29%), con una situación intermedia de Uruguay (26.32%). En 2020, en cambio, Costa Rica posee un 26.67% en ese rango y Venezuela ha caído al 7.14%, mientras Uruguay sube al 25%.

Cabe señalar que para 2020, los valores de este indicador para Costa Rica y Uruguay superan los de Argentina (22.46%), Brasil (21.85%) y México (21.39%), y todos se encuentran por debajo del promedio mundial anual (34.74 %) (StatNano 28/7/2021 d).

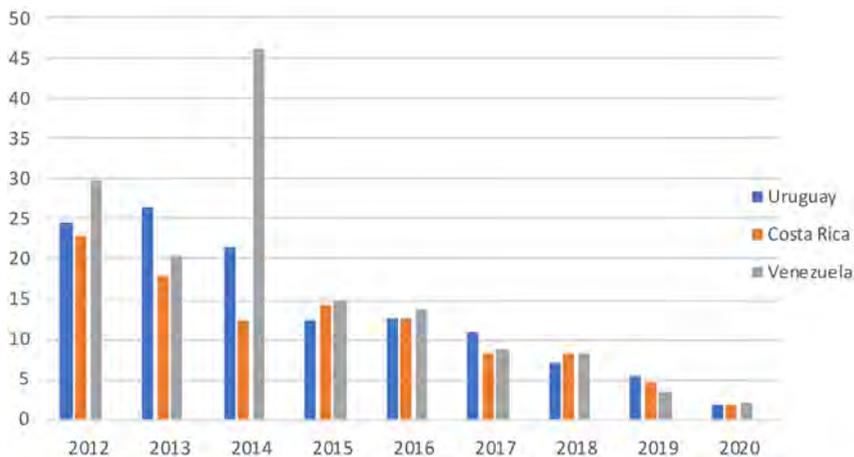
Promedio de citas de los artículos de nanotecnología

Este indicador se define como el promedio del número de veces que los artículos de nanotecnología publicados en un año han sido citados en el Journal Citation Reports (JCR) (StatNano 28/7/2021e).

En la gráfica 4 se presentan los valores para el periodo 2012-2019 para los tres países.

Al comienzo del periodo, el promedio de citas por artículo de Venezuela casi llegaba a 30 y Uruguay estaba rondando las 24.5 citas, mientras que Costa

Gráfica 4. Promedio de citas por artículo (citas por artículo).



Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 e).

Rica registraba algo menos de 23. A partir de 2015 en los tres casos, el desempeño de las citas decae marcadamente, con menos de 6 citas en 2019 y menos de 3 en 2020.

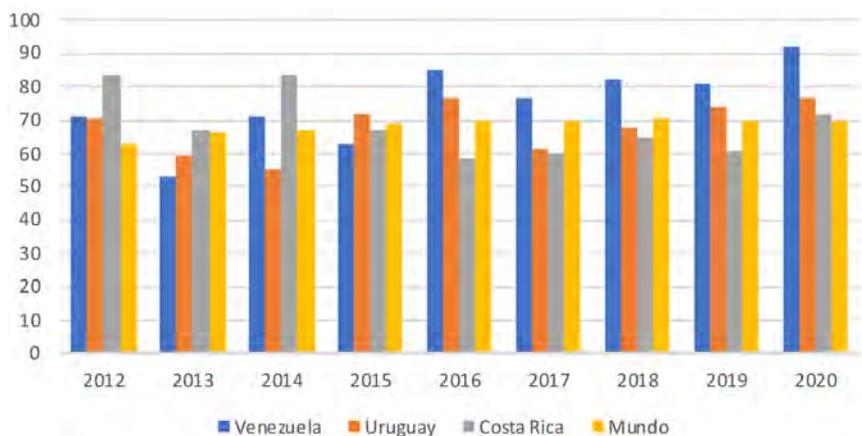
Los mayores países de la región también experimentaron el descenso antes mencionado. Los promedios de citas por artículo eran en 2020, algo superiores a los de Costa Rica, Uruguay y Venezuela: Brasil 2.59, México 2.06 y Argentina 3.01 (StatNano s/f e).

Colaboración internacional

Proporción de colaboración internacional en nanociencia (%)

Este indicador mide el nivel de colaboración internacional entre los científicos de un determinado país, que tienen una actividad de publicación en nanociencia. Se define como el número de artículos en nanotecnología con autores de dos o más países, dividido entre el total de artículos del país en ese campo (StatNano 28/7/2021 f). El porcentaje de artículos de nanotecnología realizados en colaboración en el intervalo (2012-2020) se muestra en la gráfica 5.

Gráfica 5. Participación en colaboraciones internacionales (%).



Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 f).

La participación de los tres países en las colaboraciones internacionales se mantuvo estable, con valores por encima del 50%, cercanos y a veces superiores a los porcentajes mundiales. A partir de 2016, Venezuela tuvo la mayor participación colaborativa, alcanzando en 2020 un valor superior al 90%.

Costa Rica que comenzaba el periodo superando al conjunto, se encontraba al final con el valor más bajo (algo mayor al 70%). En cambio, Uruguay, que apenas superaba al inicio el 70%, terminaba con una posición intermedia cercana al 76%.

Un relevamiento sobre colaboraciones internacionales en nanotecnología de varios países del MERCOSUR (Kay y Shapira, 2009) presentaba para Uruguay una distribución de la participación en publicaciones con coautorías de otros países, cuyos primeros cuatro valores correspondían a: i) colaboraciones de investigación con países latinoamericanos —24.1% con Chile y 14.8% con Brasil, y, ii) colaboraciones con investigadores de países extrarregionales —11.1% con España; 11.1% con Estados Unidos; y 9.3% con Francia.

Otro estudio sobre redes de colaboración internacional hasta el año 2018 identificó los 10 países con los que Venezuela tiene mayor colaboración en publicaciones científicas nano, ubicando a Estados Unidos en el primer lugar con el 15.57%, seguido de España y Francia (12.32% y 10.81%, respectivamente). También se encuentran entre los colaboradores, investigadores latinoamericanos y europeos (México, seguido de Inglaterra, Alemania, Brasil, Canadá, Argentina e Italia) (López *et al.*, 2020).

La colaboración con grupos de otros países es parte de la dinámica científica actual y atraviesa todas las disciplinas. A su vez, los países pequeños entienden las colaboraciones internacionales como la mejor manera de robustecer su estructura de investigación científica (Belli y Balta, 2019: 39-40). Como en otros casos regionales en nanotecnología, esta estrategia se inscribe en los esfuerzos por superar las limitaciones locales, a través de la participación en redes de investigación internacionales y hacer convenios con laboratorios de otros países, alcanzando la masa crítica para lograr un buen desempeño en las actividades de I+D (Foladori, 2006; RICYT, 2008).

En esa dirección, cabe destacar que, los valores de este indicador en el mismo periodo para Brasil, Argentina y México son notoriamente menores que los tres casos analizados. En 2020, los porcentajes eran los siguientes: Brasil, 37.88%, Argentina 53.55% y México 44.87%. El promedio mundial de ese año fue de 69.45% (StatNano 28/7/2021 f).

Desempeño industrial: patentes

La norma ISO / TS 18110 (1a edición 2015-08-15), define las patentes de nanotecnología como aquellas que incluyen por lo menos una reivindicación relacionada con la nanotecnología que se pretende proteger, o que tiene uno de los códigos de nanotecnología de la clasificación IPC (StatNano 26/7/2021 g).

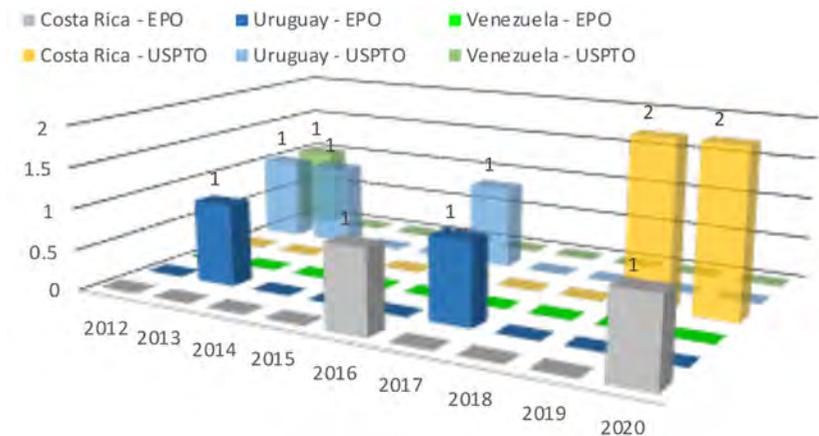
Patentes de nanotecnología en EPO y en USPTO

La gráfica 6 presenta el número de patentes de nanotecnología otorgadas por EPO y por USPTO en Costa Rica, Uruguay y Venezuela entre 2012 y junio de 2021.

De los tres países abordados, solamente Costa Rica se ha adherido al Tratado de Cooperación en materia de Patentes (PCT).

Las patentes de Costa Rica están relacionadas con un par de dispositivos médicos, un podómetro para medir pasos para personas de la tercera edad con

Gráfica 6. Patentes de nanotecnología en EPO y en USPTO (patente).



Fuente: Elaboración propia con base en StatNano (28/7/2021 g; 28/7/2021 h).

el fin de relacionar los resultados obtenidos con enfermedades crónicas. Este dispositivo posee tres sensores que permiten mejorar los valores obtenidos respecto a otros productos en el mercado. Está patentado en Estados Unidos, Costa Rica, Europa y Brasil. La segunda patente está vinculada con la obtención de nanoliposomas de quitosano empleados como mecanismos contra infecciones intrahospitalarias.

Uruguay es un país no adherido al PCT, y son varias las opciones para patentar que eligen los nanotecnólogos locales. Investigadores del Polo Tecnológico de Pando (PTP) han logrado patentar un proceso de preparación de materiales gráficos magnéticos, desarrollado conjuntamente por científicos de la Universidad Federal de San Carlos, Brasil y UDELAR. Después de un periodo de algunos años en los que se solicitó patente bajo PCT, también ante EPO y la USPTO, en noviembre de 2012 la patente fue concedida por esta última oficina.

Además, el grupo del PTP solicitó en México un registro de patente PCT, de un material filtrante y filtro para retener hidrocarburos poliaromáticos, carbonilos y otros compuestos del humo de productos del tabaco y procesos industriales. Las instituciones financiadoras son UDELAR y una empresa local de tabaco. La patente fue solicitada en México por una compañía mexicana subsidiaria de la empresa uruguaya, por la universidad y por la tabacalera de Uruguay.

El caso de Venezuela, con una sola patente otorgada en los últimos 10 años, evidencia no solo la escasa tradición en el país de estas prácticas, sino también los efectos de la crisis en el área de desarrollo tecnológico e innovación. Las patentes en todas las áreas de conocimiento representan uno de los elementos más afectados, no solo por la crisis, sino principalmente por la po-

lítica de protección de la propiedad intelectual aplicada por el Estado en los últimos quince años. Según un estudio realizado por De la Vega *et al.* (2008), basado en datos del Servicio Autónomo de Propiedad Intelectual (SAPI) de Venezuela, las primeras patentes en nanotecnología se registran en el año 1991 y ya para 2006 se registran 44 patentes otorgadas. Del total de solicitudes presentadas solo el 11% correspondía a instituciones venezolanas. Justamente en el año 2006 se produjo la salida de Venezuela de la Comunidad Andina de Naciones (CAN) que establecía un régimen de protección intelectual entre los países miembro. Esta decisión del gobierno venezolano significó un retroceso en esta materia para Venezuela y a partir de entonces, el SAPI implementó una política de abstención en el otorgamiento de patentes que se mantiene hasta hoy, bajo el argumento de que las patentes son instrumentos que limitan el conocimiento libre.

Estos casos están en consonancia con la situación de la región, donde son relativamente pocas las patentes de invención en la mayoría de los países (RICYT, 2008). En 2020, los valores de patentes concedidas en la EPO eran los siguientes: para Brasil 6, Argentina 0, y para México 2. En USPTO en cambio, la distribución era de 10 patentes para Brasil, 8 para México y 1 para Argentina StatNano (28/7/2021 g; 28/7/2021 h).

Discusión final

Durante las dos últimas décadas, el desarrollo de actividades de I+D en nanotecnología experimentó un proceso de expansión en los países abordados en este trabajo, en términos de la institucionalización del campo, la diversificación de líneas y grupos de investigación, y la producción científica y tecnológica.

En el diseño de las políticas públicas de estos países es posible reconocer, además de elementos comunes en las agendas de CTI y en los instrumentos de política, algunas variaciones nacionales.

Con base en las propias dinámicas disciplinarias, así como en decisiones asumidas desde fines de los años 90 del siglo pasado, se fue generando un ecosistema institucional de importancia, dando cuenta de la relevancia del campo en las agendas nacionales de CTI.

Diversas organizaciones (institutos, centros, laboratorios, redes, unidades académicas) han asumido la I+D en nanotecnología, con distintas líneas de investigación, con un creciente número de investigadores y con iniciativas de vinculación tecnológica con los sectores gubernamental y privado.

En el caso de Costa Rica se constata una creciente articulación interuniversitaria e interinstitucional. En Uruguay predomina una pauta fundamentalmente académica de organización de la nanotecnología (con la presencia destacada de la Universidad de la República), a la que se integran iniciativas de vinculación con el sector productivo en pos de desarrollos tecnológicos y patentes. En Venezuela, se ha generado el desarrollo paralelo de un nuevo sector gubernamental de educación superior, con el decaimiento y la asfisia

financiera de las universidades públicas con mayor capacidad de investigación y con una fuerte emigración de científicos. Esto se expresó en una sensible caída del desempeño del país en el campo.

No existe en ninguno de los tres países una política específica de nanotecnología, más allá de su reconocimiento como área estratégica prioritaria en los programas nacionales de CTI.

Tampoco hay financiamiento destinado a la I+D en nanotecnología, salvo en Venezuela, donde la RedVnano logró el apoyo económico del gobierno para varias iniciativas de movilidad, formación avanzada e investigación en el sector.

El acceso a financiamiento y a instrumental de trabajo son cruciales en general en la investigación y muy particularmente en este campo. Sin un consistente apoyo estatal, las actividades de I+D podrían orientarse casi exclusivamente a las demandas del mercado, postergando una mayor conexión con demandas sociales, tanto o más estratégicas.

El conocimiento sobre los nanomateriales ha avanzado considerablemente, sin embargo, no tanto la evaluación de los potenciales riesgos contra la salud humana y el ambiente, así como su gestión. La falta de visibilidad detectada en Uruguay sobre el tema de la nanoseguridad, coincide con lo planteado tiempo atrás por Foladori e Invernizzi (2008) relativo a los escasos niveles de información pública y de participación, y a una práctica científica que se encapsula en un círculo reducido de actores.

En Costa Rica, se desarrolla desde hace cuatro años el proceso de normalización de la nanotecnología, incluido LANOTEC que está atravesando el proceso de certificación ISO 17025-2017. Se está participando en el desarrollo de mecanismos de *soft-law* (reglamentación blanda). En Uruguay, la iniciativa de UNITAR fue un estímulo a la discusión y consideración del tema por los nanotecnólogos y autoridades locales. En Venezuela no existen iniciativas de reglamentación de las nanotecnologías.

En cuanto a la producción científica considerada en términos de artículos indexados en la *Web of Science*, la evolución de los resultados de los tres países en la última década presenta resultados muy diferentes. Uruguay se posicionó a la cabeza de la producción, Costa Rica incrementó la misma y Venezuela decayó.

En relación con la prioridad nacional de la nanociencia, la evolución de los tres países en la década mostró un desempeño semejante. Uruguay mejoró en este indicador, Venezuela desmejoró y Costa Rica estuvo parcialmente en alza, con picos en determinados años.

En visibilidad internacional de la producción de los países estudiados, medida a partir de su presencia en revistas del primer cuartil, el liderazgo correspondió a Costa Rica en 2020, mientras que Uruguay y Venezuela estaban claramente por detrás. También en las revistas del 10% superior Costa Rica tiene una posición destacada a finales del periodo, por encima de los otros dos países.

La producción de patentes de nanotecnología de los tres países en las oficinas internacionales (EPO y USPTO) también siguió pautas diferentes. El liderazgo relativo fue de Costa Rica, seguido por Uruguay y marginal el desempeño de Venezuela. El registro se verificó en la mayor parte de los casos en la oficina norteamericana.

Adicionalmente, nuestro estudio destaca que la participación de Costa Rica, Uruguay y Venezuela en las colaboraciones internacionales se mantuvo relativamente estable, con los mayores valores de participación colaborativa en Venezuela a partir de 2016. Los valores para estos tres países al final del periodo fueron superiores al porcentaje del mundo. Superaron también los valores de los mayores países de la región, Brasil, Argentina y México.

Dados los altos niveles de colaboración internacional de estos tres casos, consideramos la importancia de estudios futuros sobre su participación en redes con investigadores de diferentes países y las configuraciones de esas colaboraciones para los países con una menor concentración de actores y recursos en I+D.

Esta primera aproximación comparativa a la situación de la nanotecnología en Costa Rica, Uruguay y Venezuela, muestra que las últimas dos décadas han sido el marco temporal de un proceso de creciente institucionalización e internacionalización de la nanotecnología en los países considerados, en los cuales el desarrollo de este campo ha seguido fundamentalmente pautas nacionales, pero enfrenta desafíos comunes.

Referencias

- ANII. (2017). *Indicadores de ciencia, tecnología e innovación en Uruguay*. Unidad de Evaluación y Monitoreo 2017. <https://www.anii.org.uy/institucional/documentos-de-interes/21/boletin-de-indicadores/>
- Chiancone, A. (2012). Nanociencias y nanotecnologías en Uruguay: áreas estratégicas y temáticas grupales. En Guillermo Foladori, Noela Invernizzi, y Edgar Záyago (eds.), *Perspectivas sobre el desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*. México: M.A. Porrúa, 201-210.
- Chiancone, A. y Martínez Larrechea, E. (2015). Caracterización del desarrollo de las nanotecnologías en Uruguay y el Plan Piloto de UNITAR. En: Guillermo Foladori; Anwar Hasmy, Noela Invernizzi y Edgar Záyago Lau (eds.), *Nanotecnologías en América Latina: trabajo y regulación*, 95-105. Ciudad de México: Miguel Ángel Porrúa.
- Belli, S, y Balta, J. (2019). Mapeo de las publicaciones científicas entre América Latina, el Caribe y la Unión Europea. *América Latina Hoy*, 82: 7-41.
- Cueto, M. (1989). *Excelencia científica en la periferia. Actividades científicas e investigación biomédica en el Perú, 1890-1950*. Lima: GRADE/ CONCYTEC.
- De la Vega, I., Suárez, M., Blanco, F., Troconis, A. y Aponte, G. (2008). Las tecnologías nanoscópicas en los centros y las periferias. El caso de los nanomateriales en Venezuela. En Foladori, G. e Invernizzi, N. (coords.), *Las nanotecnologías en*

- América Latina*. México: Miguel Ángel Porrúa, 125-146.
- Diez, E., Freitas, Y., García-Pérez, M., Ordóñez, L., Pineda, J., Requena, J. y Romero, S. (2020). *Venezuelan research community migration: impacts and public policy implications*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/en/venezuelan-research-community-migration-impacts-and-public-policy-implications>
- Foladori, G. e Invernizzi, N. (coords.). (2008). *Las nanotecnologías en América Latina*. México: Miguel Ángel Porrúa.
- Foladori, G., Invernizzi, N. y Záyago Lay, E. (orgs.). (2012). *Perspectivas sobre el desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*. México: Miguel Ángel Porrúa.
- Foladori, G. e Invernizzi, N. (2013). Inequality gaps in nanotechnology development in Latin America. *Journal of Arts and Humanities*, 2 (3): 35-45.
- Foladori, G., Invernizzi, N. y Záyago Lau, E. (2016) *Investigación y mercado de nanotecnologías en América Latina*. México: Miguel Ángel Porrúa.
- Hannerz, U. (2015). Center-periphery relationships. En James D. Wright (ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Elsevier, 308-311.
- Invernizzi, Noela, Hubert, Matthieu y Vinck, Dominique. (2014). Nanoscience and nanotechnology: how an emerging area on the scientific agenda of the core countries has been adopted and transformed in Latin America. En Eden Medina, Ivan da Costa Marques y Christina Holmes (eds.), *Beyond imported magic. Essays on science, technology, and society in Latin America*. Cambridge, Massachusetts, Londres: The MIT Press, 223-242.
- Kay, L. y Shapira P. (2009). Developing nanotechnology in Latin America. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(2): 259-278. <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9503-z>
- Kreimer, P. (2010). Ciencia y periferia. *Nacimiento, muerte y resurrección de la biología molecular en la Argentina*. Buenos Aires: Eudeba.
- López S. Trocel C., Hasmy A. y Vessuri, H. (2015). Estado actual de la nanociencia y nanotecnología en Venezuela. En Guillermo Foladori; Anwar Hasmy, Noela Invernizzi y Edgar Záyago Lau (eds.) *Nanotecnologías en América Latina: trabajo y regulación*. México: Miguel Ángel Porrúa, 111-134.
- López, S. Robles-Belmont, E. y Pacheco, L. (2020). La investigación en nanoescala en Venezuela. A diez años de la propuesta del Plan Nacional de Nanotecnología. En Edgar Záyago Lau Guillermo Foladori y Noela Invernizzi (coords.), *Relevancia social de las nanotecnologías en América Latina*. México: Miguel Ángel Porrúa, 157-177.
- MICITT. (2018). *X Informe de Indicadores Nacionales de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Costa Rica, San José: MICITT.
- Matharan, G. (2017). La dinámica centro-periferia en el estudio de la ciencia en América Latina: notas para una reflexión historiográfica sobre la Argentina. *El Hilo de la Fábula*, (16): 33-48. <https://doi.org/10.14409/hf.v0i16.6279>
- Méndez, E. (2015). *Regulación de nanomateriales: visión de Uruguay*. Presentación en el Taller Técnico sobre Nanotecnología y Nanomateriales, enfoque en Nanoseguridad América Latina y Caribe. Bogotá, Colombia, 22-24 June 2015. <https://www.unitar.org/media/2495>

- Mercado, A., Ávalo, I., Sánchez-Rose, I., Cervilla, M., Autora y Vessuri, H. (2020). *Doing research in Venezuela. Science, technology and innovation capabilities to overcome the crisis in Venezuela*. Canadá, International Development Research Center (IDRC) y Global Development Network (GDN). <http://www.gdn.int/sites/default/files/u115/Venezuela%20Report%20Spanish%20with%20ISBN.pdf>
- ONCTI. (2016). *Indicadores venezolanos de ciencia, tecnología e innovación*. Boletín año 2016. Observatorio Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. Caracas, Ediciones ONCTI.
- Pohl Consulting & Asociados. (2016). *Áreas de vacancia en I+D según la perspectiva del Sector Productivo*. <http://www.anii.org.uy/institucional/documentos-de-interes/25/consultoria-fortalecimiento-del-sistema-nacional-de-innovacion>
- Polo Tecnológico. (s/f). *¿Qué es el Polo Tecnológico de Pando?* <http://www.polotecnologico.fq.edu.uy/es/que-es-el-polo-tecnologico-de-pando>
- RICYT. (2008). *La nanotecnología en Iberoamérica. Situación actual y tendencias*. http://www.riicyt.org/wp-content/uploads/2019/09/Estado_2008_03Nano.pdf
- RICYT. (2020). *Uruguay 2007-2016. Recursos financieros I+D*. http://dev.riicyt.org/ui/v3/bycountry.html?country=UY&subfamily=CTI_IMD
- StatNano. (28/7/2021a). *Nanotechnology publications (article)*. <https://statnano.com/report/s29>
- StatNano. (28/7/2021b). *National priority in nanoscience*. <https://statnano.com/report/s41>
- StatNano. (28/7/2021c). *Share of Q1 nanotechnology publications (percent)*. <https://statnano.com/report/s143>
- StatNano. (28/7/2021d). *Share of top 10% nano-articles of Q1 nano-articles (percent)*. <https://statnano.com/report/s145>
- StatNano. (28/7/2021e). *Average citation per nanotechnology article (citations)*. <https://statnano.com/report/s55>
- StatNano. (28/7/2021f). *Share of international collaboration in nanoscience (percent)*. <https://statnano.com/report/s82>
- StatNano. (28/7/2021g). *Nanotechnology patents in EPO (patent)*. <https://statnano.com/report/s102>
- StatNano. (28/7/2021h). *Nanotechnology patents in USPTO (patent)*. <https://statnano.com/report/s103>
- Vega Baudrit, J. (2016). *Plan Estratégico de Desarrollo 2016-2020*. San José: LANOTEC.
- World Bank. (s/f). *GDP per capita (current US\$)*. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.KD>

Governança, nanotecnologia e a necessidade de capacitação da força de trabalho

Governance, nanotechnology and the need for training the workforce

Gobernanza, nanotecnología y necesidad de formación de la fuerza de trabajo

Arline Sydneia Abel Arcuri,^{*†} Jorge Marques Pontes,^{**} Jose Renato Alves Schmidt,^{*} Luís Renato Balbão Andrade,^{*} Maria de Fatima Torres Faria Viegas,^{*} Valéria Ramos Soares Pinto,^{*} Antonio Gracias Vieira Filho^{***}

ABSTRACT: This article aims to highlight the contributions of the project “Impacts of nanotechnologies on workers’ health” developed by Fundacentro, Brazil, between 2006 and 2019, for the training of workers with a view to the participatory governance in nanotechnology. As indicators of these contributions, it was used the description of the actions developed and a collection of citations found on the Internet about the project, especially those produced by unions or workers’ organizations. On this way, uncovering the actions developed and the references made about these actions on the Internet and publications on the topic, it is possible not only to guarantee the relevance of the project, but also to obtain a consistent indication of the scope and dissemination of the knowledges addressed.

KEYWORDS: participatory governance, public policies, nanotechnology, workers’ training.

RESUMEN: Este artículo tiene como objetivo resaltar las contribuciones del proyecto “Impactos de las nanotecnologías en la salud de los trabajadores” desarrollado por Fundacentro, Brasil, entre 2006 y 2019, para la formación de trabajadores con miras a la gobernanza participativa en nanotecnología. Como indicadores de estos aportes se utilizó la descripción de las acciones desarrolladas y una colección de citas encontradas en Internet sobre el proyecto, especialmente las producidas por sindicatos u organizaciones de trabajadores. De esta forma, destacando las acciones llevadas a cabo y las referencias que se hacen sobre estas acciones en Internet y las publicaciones sobre el tema, es posible no solo garantizar la relevancia del proyecto, sino también obtener una indicación coherente del alcance y difusión de los conocimientos abordados.

PALABRAS CLAVE: gobernanza participativa, políticas públicas, nanotecnología, formación de trabajadores.

RESUMO: Este artigo tem por objetivo evidenciar as contribuições do projeto “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” desenvolvido pela Fundacentro, Brasil, entre 2006 e 2019, para a capacitação dos trabalhadores, tendo em vista uma governança participati-

Recibido: 26 de mayo, 2021. Aceptado: 13 de agosto, 2021. Publicado: 27 de septiembre, 2021.

* FUNDACENTRO – Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. Brasil.

** Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo (FSP-USP). Brasil.

*** Pesquisador na área de gestão e cultura contemporânea. Brasil.

† Autor responsável: arline@fundacentro.gov.br



va em nanotecnologia. Foram utilizados como indicadores destas contribuições a descrição das ações desenvolvidas e um levantamento de citações encontradas na internet sobre o projeto, especialmente as produzidas por sindicatos ou entidades de trabalhadores. Ao evidenciar as ações desenvolvidas e as referências feitas à estas ações na Internet e publicações sobre o tema é possível não só garantir a pertinência do projeto, como também obter uma indicação consistente do alcance e difusão dos conhecimentos abordados.

PALAVRAS-CHAVE: governança participativa, políticas públicas, nanotecnologia, capacitação de trabalhadores.

Introdução

A palavra governança já é usada desde o século XIX, sendo que a partir da década de 1980 passou a ser denominada de governança corporativa devido aos conflitos no ambiente das empresas entre acionistas e demais partes interessadas nos negócios organizacionais (Serafim, Quelhas & Alledi, 2010). Este termo passou a ser incorporado a várias formas de organização, em diferentes processos de governar, seja realizado por um Estado, pelo mercado ou por uma rede; em um sistema social (familiar, de um grupo, de uma organização formal ou informal, um território ou através de territórios) ou ainda através de leis, normas, poder ou linguagem. Vale ressaltar que o que estabelece a diferença entre governo e governança é o fato de que o primeiro tem o foco no Estado e suas instituições, enquanto o segundo se baseia em atividades e práticas sociais (Bevir, 2012).

Fazer a gestão de determinado processo de elaboração de diretrizes ou de produção, implica também em uma reestruturação social. Tomemos como exemplo a indústria 4.0 ou a manufatura avançada, este tipo de produção de bens implica em mudanças sistêmicas que atingem o setor de serviços, a forma com que os consumidores se relacionam com as empresas no pré e pós-venda. Contudo, não se pode negligenciar que existe outro grupo humano envolvido em todo processo, os trabalhadores, e estes, mesmo que em número menor que na indústria tradicional, também são atingidos pelas mudanças no processo de produção.

Estas mudanças geradas a partir da adaptação a novas formas de produção podem influenciar relações no ambiente de trabalho, organização deste ambiente no seu tempo e espaço, adaptações do trabalhador às novas tecnologias, desemprego tecnológico e ainda, a relação com os fornecedores das matérias-primas. Estes impactos sistêmicos merecem uma gestão holística, uma governança, a capacidade de gerir de forma ampla um conjunto de fatores relacionados a um determinado contexto. Isto implica em conhecer os diferentes atores sociais envolvidos no contexto da gestão da empresa sejam eles, os consumidores, os trabalhadores, os fornecedores de matéria-prima (Pontes & Arcuri, 2018).

Entretanto, cada vez mais a sociedade exige responsabilidade social das empresas em relação ao meio ambiente natural e aos valores e costumes locais. Logo, se torna necessário também nesta esfera a empresa se legitimar diante

da sociedade, ou seja, adquirir confiabilidade. A estratégia adotada pelas empresas privadas para que isto aconteça tem sido compartilhar a gestão empresarial com os atores sociais envolvidos através da criação de conselhos consultivos, composto por membros da sociedade. Este comportamento pode se considerar como uma atualização do próprio conceito de governança corporativa que surgiu na década de 1980.

Quando o conceito de governança passa a ser adotado pelo Estado, este não pode ter a mesma perspectiva da empresa privada, pois os problemas enfrentados pelo ente estatal são mais complexos e amplos que a empresa. A complexidade se deve aos diferentes interesses, costumes e valores dos atores sociais envolvidos. Uma empresa atende determinado público, os seus consumidores. Já o Estado atende a sociedade de modo geral — os cidadãos — e os seus atos podem influenciar outros interessados não envolvidos diretamente no problema discutido. Além disso, o Estado utiliza, entre outras formas legais, das políticas públicas como uma ferramenta impositiva para fazer valer suas ações e assim, para incorrer na legitimidade dos seus atos, ele deve utilizar abordagens mais colaborativas e participativas na gestão de interesses relacionados a um contexto, solucionando conflitos sociais para atender um objetivo comum, a isto se denomina governança democrática ou participativa (Pontes, 2015). Dingwerth (2004) destaca que governança participativa ou democrática, como ele classifica, deve ter como elementos centrais uma interação equilibrada entre as forças sociais — organizadas em grupos de interesse, partidos políticos ou outras associações voluntárias — e a dispersão do poder entre uma variedade de atores sociais.

No contexto das nanotecnologias, entende-se que para que uma governança seja, verdadeiramente, participativa é necessário que todos os envolvidos no debate estejam familiarizados com o assunto que o mobiliza — a nanociência e as nanotecnologias. Desta forma, os trabalhadores são parte interessada e devem ter protagonismo nas discussões sobre o tema, sendo que, para que isso seja possível, eles devem ter acesso às informações e conhecimentos fundamentais sobre esse campo científico. É isso o que Arns e Neumann (2015), citando trabalho de Dodd e Boyd (2000), apontam quando veem a “necessidade de se minimizar a disparidade de capacidades (*capacity gap*) entre os potenciais parceiros” e aconselham o fortalecimento da “habilidade das pessoas, comunidades e instituições” como algo primordial para “planejar, desenvolver, implementar e manter iniciativas exitosas”.

Foi imbuída deste espírito que entre 2006 e 2019 a Fundacentro desenvolveu um projeto de pesquisa sobre impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores e no meio ambiente. Essa iniciativa recebeu o nome de “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” sendo que, nos anos finais (2018-2019), a denominação “outras tecnologias” foi incluída. É importante registrar que no Brasil, mesmo antes do projeto, já havia algumas iniciativas sindicais voltadas aos impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores (Martins e col., 2014).

Neste esteio, o projeto foi proposto, principalmente, para difundir conhecimentos para que os trabalhadores adquirissem conteúdo que permitisse a compreensão do que são as nanotecnologias, quais os possíveis riscos que elas podem ocasionar e quais as necessidades para que se protejam destes possíveis efeitos adversos. Na visão dos pesquisadores envolvidos, este seria o caminho para fortalecer os atores sociais em um debate nas empresas, nos sindicatos e nas instâncias de governança participativa promovida pelos entes governamentais.

Este artigo tem o objetivo relatar as contribuições do projeto “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” desenvolvido na Fundacentro, Brasil, entre anos de 2006 e 2019, visando à capacitação dos trabalhadores, tendo em vista oportunizar a participação efetiva destes atores sociais no debate sobre nanotecnologias. Isto está em consonância com o conceito de governança participativa para o âmbito das nanociências e nanotecnologia, evidenciado nesta introdução e, acrescido da especial atenção dos pesquisadores aos possíveis impactos desta tecnologia à segurança e a saúde dos trabalhadores.¹

A Fundacentro e a metodologia descritiva deste artigo

Inicialmente, cabem esclarecimentos sobre a instituição onde o projeto em análise foi gestado e implantado, a Fundação Jorge Duprat Figueiredo, de Segurança e Medicina do Trabalho – Fundacentro, pois, trata-se de uma instituição estatal, de nível federal, fundada em 1966 e que possui autonomia didático-científica, administrativa e de gestão financeira e patrimonial. A finalidade precípua é a de elaborar estudos e pesquisas sobre as questões de segurança, higiene, meio ambiente e medicina do trabalho. Ressalta-se que nos desdobramentos desta finalidade, encontra-se a de desenvolver e executar programas de formação, aperfeiçoamento e especialização de mão de obra profissional, relacionados com as condições de trabalho nos aspectos de saúde, segurança, higiene e meio ambiente do trabalho e do trabalhador.

A instituição possui pesquisadores de diferentes áreas de conhecimento, característica que coaduna com o seu campo de atuação que é a saúde do trabalhador, interdisciplinar e multiprofissional, que tem complexos processos de análise do trabalho imbricado com a saúde (Pontes, 2015). O projeto “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” desenvolvido na instituição a partir de 2006 guarda uma estreita relação com a finalidade precípua da entidade, assim como a formação de seus pesquisadores participantes do projeto e os quais, alguns deles, são autores neste artigo.

¹ O uso de termos no gênero masculino neste texto ocorre tão somente por adaptação às regras gramaticais, sendo assim, a utilização dos termos desta forma não contém ou implica qualquer tipo de referência sexista.

Para avaliar a contribuição de 13 anos (2006-2019) do projeto no fomento de uma governança participativa em nanotecnologia, foi elaborado o relatório final entre janeiro e julho de 2020, com buscas em bases de referências acadêmicas — Google Acadêmico e Web Of Science —, nos bancos de teses e dissertações de universidades brasileiras, na internet em geral por citações de trabalhos, nos relatórios internos de cursos, eventos, estratégias de comunicação científica desenvolvidas e revisões de literatura realizadas pelos integrantes do projeto. Ressalta-se que no resumo dos achados deste relatório final, ainda não publicado, e em registros e relatórios internos do projeto feitos durante sua vigência, existe uma carência de textos elaborados por entidades sindicais que façam referência a este projeto desenvolvido pela entidade.

Na relação de resultados de resultados da busca se encontra 220 palestras, sendo que 30% delas foram diretamente programadas ou contaram com a participação de alguma entidade sindical. Isto reforça a nossa surpresa com a falta de textos elaborados por entidades sindicais relatada no parágrafo anterior. Ainda no mesmo período do projeto foram concedidas 77 entrevistas; publicados 33 artigos e capítulos de livros em revistas nacionais e internacionais; coordenados e executados 28 eventos e; ministrados inúmeros cursos e minicursos. Alguns destes relatos serão evidenciados no decorrer deste artigo.

Surgimento de instâncias de governança das nanotecnologias no Brasil

Inicialmente se faz necessário destacar que no Brasil o financiamento das pesquisas em nanotecnologia começou no Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) com a criação de quatro redes científicas (nos anos 2000). Em 2004, foi incorporado no Plano Plurianual de Ciência e Tecnologia (2004-2007) um programa específico para o desenvolvimento nanotecnológico, posteriormente ampliado com o lançamento do Programa Nacional de Nanotecnologia (Berger e Berger Filho, 2021). Em anos seguintes, novas redes de pesquisa foram formadas, juntamente com a criação de comitês e fóruns para assessoramento/governança das ações relacionadas a nanotecnologia, assim como formalizadas outras iniciativas (Schmidt, 2017; Quevedo, 2019; Brasil, 2016; Plentz e Fazzio, 2013; Brasil, 2019), tais como: a) Foi instituído pela primeira vez pela Portaria nº 587, de 10 de setembro de 2007, um Comitê Consultivo de Nanotecnologia (CCNano), pelo MCT; b) Em 2009 foi criado o Fórum de Competitividade em Nanotecnologia, por iniciativa do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Foi criado como ferramenta estratégica para apoiar a discussão e encaminhamento de iniciativas e programas segundo os objetivos da Política de Desenvolvimento Produtivo da época, que destacou a Nanotecnologia como programa mobilizador em área estratégica; c) Pela Portaria Nº 260, de 3 de maio de 2011, foi instituído o Comitê Consultivo de Nanotecnolo-

gia (CCNANO), pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Este comitê tinha como objetivo assessorar o mesmo ministério na definição dos macros objetivos, áreas prioritárias, diretrizes, alocação de recursos, avaliação de iniciativas, ações, programas e projetos da área de nanotecnologia; d) A Portaria Interministerial N° 510, de 9 de julho de 2012, institui pelo Ministério da Ciência, tecnologia e Inovação (MCTI) o Comitê Interministerial de Nanotecnologia – CIN. Este comitê tinha a finalidade de assessorar os dez Ministérios nele representados na integração da gestão e na coordenação, bem como no aprimoramento das políticas, diretrizes e ações voltadas para o desenvolvimento das nanotecnologias no País; e) Em 2013 o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) lançou a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia (IBN), que se caracteriza por ser um conjunto de ações com o objetivo de criar, integrar e fortalecer as atividades governamentais e os agentes ancorados na nanociência e nanotecnologia, almejando o desenvolvimento científico e tecnológico do setor, com foco na inovação (BRASIL, 2013a); f) O Decreto n° 10.095, de 7 de novembro de 2019 instituiu o Comitê Consultivo de Nanotecnologia e Novos Materiais (CCNANOMAT). Segundo o MCTI este comitê foi criado no âmbito da governança das temáticas de Nanotecnologia e Novos Materiais.

Segundo Invernizzi e colaboradores (2019), no Brasil:

A rápida inclusão da nanotecnologia na agenda da PCTI (política de ciência, tecnologia e inovação) resultou da ação conjunta de três elementos: a influência internacional, o protagonismo da comunidade científica local, e uma racionalidade comum compartilhada por organizações internacionais, decisores políticos e cientistas sobre o papel da ciência na inovação e no desenvolvimento.

Desta forma as ações voltadas ao tema visavam especialmente a promoção da competitividade nacional. Ainda segundo Invernizzi e colaboradores (2019) e que também pode ser observado nas primeiras ações governamentais no Brasil com relação à nanotecnologia, o primeiro comitê em 2007 era centrado na presença de cientistas que já vinham trabalhando na área, antes mesmo destas iniciativas governamentais. O segundo comitê instituído em 2011 também era formado por cientistas ligados a universidades ou instituições públicas como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e outras além de representantes de entidades de setores industriais tais como Associação Nacional de P&D das Empresas Inovadoras (ANPEI) e a Confederação Nacional da Indústria (CNI).

Em 2012, visando a governança das ações voltadas à nanotecnologia no país, foi instituído o Comitê Interministerial de Nanotecnologia. Originalmente este comitê era formado por 8 ministérios e depois foram acrescentados os Ministérios do Trabalho e da Defesa da época, este último porque tem sob sua estrutura a Secretaria Nacional do Consumidor (Senacon). Também, como convidados, participavam a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), o BNDES, o CNPq,

o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Finep, por terem segundo estes autores, papel central na definição e implementação da Política Brasileira de Nanotecnologia (PBN) (Plentz e Fazzio, 2013). Como representantes do Ministério do Trabalho neste comitê foram indicados o Dr. Luís Renato Balbão Andrade e a Ma. Maria de Fátima Torres Faria Viegas, ambos servidores da Fundacentro e participantes do projeto de nanotecnologia da entidade. Na primeira reunião com a participação do Dr. Andrade, o mesmo sugeriu que fossem convidados para o Comitê representantes de sindicatos de trabalhadores. O convite foi feito e foram indicados pela CUT e Força Sindical os sindicalistas Antônio Goulart e Luís Carlos De Oliveira, (Ribeiro, 2013) respectivamente. Ambos os participantes de inúmeras atividades do projeto da Fundacentro.

Já o Decreto nº 10.095, de 7 de novembro de 2019 que instituiu o Comitê Consultivo de Nanotecnologia e Novos Materiais, embora prevendo em sua composição três representantes de organizações da sociedade civil, de entidades de classes ou similares, estas vagas foram indicadas para serem preenchidas pela Associação Brasileira de Startups (ABStartups); pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e pela Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Empresas Inovadoras (ANPEI), sem, portanto nenhuma representação dos trabalhadores (Brasil, 2020b).

Outra comissão que tem papel de governança em políticas públicas, neste caso dedicadas à segurança e saúde dos trabalhadores (SST), a Comissão Tripartite Paritária Permanente (CTPP), que revisa e elabora normas de segurança e saúde do trabalhador, é uma comissão tripartite com representação do governo, empregadores e trabalhadores. Um dos representantes dos trabalhadores, que participou ativamente do projeto da Fundacentro, levou para a comissão a necessidade de se discutir alguma regulamentação relativa à SST. Não houve progresso nesta reivindicação porque a bancada dos empregadores avaliou que isto não seria necessário, especialmente, segundo a posição deles, devido ao fato da produção de nanomateriais no Brasil ser em pequena escala.

Destaca-se ainda, embora esta ação não possa ser incluída como parte da governança em políticas públicas das nanotecnologias,² que a Convenção Coletiva de Trabalho (CCT) da Federação dos Trabalhadores do Ramo Químicos da CUT (FETQUIM – CUT) do setor farmacêutico de 2012, “registra, pela primeira vez na história do sindicalismo brasileiro – e, possivelmente, mundial – uma cláusula específica sobre nanotecnologias” (FETQUIM, 2015; Schmidt, 2017). Cláusula semelhante foi assinada na convenção coletiva com a Federação dos Trabalhadores nas Indústrias Químicas e Farmacêuticas do estado

² A Convenção Coletiva de Trabalho (CCT) tem limitações que a impedem de se tornar uma política pública em sentido amplo. Em primeiro lugar por ter seus efeitos restritos aos filiados das representações assinadas no documento. Segundo, porque a discussão das cláusulas não é feita com a presença do Estado, apesar do acordo ser referendado por este.

de São Paulo (FEQUIMFAR) (Vasconcellos *et al.*, 2021). Estas cláusulas visam garantir o direito dos trabalhadores à:

[...] informação da introdução de nanotecnologia nas indústrias e de suas aplicações no ambiente de trabalho, apontando para a responsabilidade das empresas na prevenção sobre impactos das nanotecnologias nos trabalhadores. (Schmidt, 2017).

Cláusulas abordando nanotecnologia continuam presentes em convenções coletivas do setor farmacêutico para os anos de 2021-2023 (SINDUS-FARMA, 2021). Embora estas cláusulas não poderem ser atribuídas unicamente às ações da Fundacentro, muitos dos sindicalistas tanto da CUT quanto da FEQUIMFAR participaram em inúmeras atividades desenvolvidas no âmbito do trabalho da entidade.

Contribuições do Grupo de Pesquisa da Fundacentro

Palestras informativas

Como uma das primeiras contribuições à governança participativa das nanotecnologias no país, foram realizadas palestras informativas com foco a conscientizar os trabalhadores sobre esta nova tecnologia. Uma das primeiras palestras proferida sobre o tema por pesquisador da Fundacentro ocorreu em 20 de setembro de 2007, na XIV – SEMSAT – Semana de Saúde do Trabalhador – 27 anos do Departamento Intersindical de Estudos e Pesquisas de Saúde e dos Ambientes de Trabalho (DIESAT), com o tema “Apresentação de conceitos básicos sobre nanotecnologia” (Martins *et al.*, 2014). Nos anos seguintes, das cerca de 220 palestras ministradas, no período do projeto, por pesquisadores da Fundacentro em eventos como seminários, congressos e debates, pelo menos 30% deles foram organizados diretamente por sindicatos e organizações de trabalhadores ou que tiveram a colaboração destas entidades.

A composição do público nestas palestras citadas era massivamente de trabalhadores interessados no tema, contando com participações eventuais de estudantes de cursos técnicos, graduação e pós-graduação. Uma estimativa média de participação pode ser considerada entre 70 pessoas. Também foram realizadas palestras em universidades, neste caso, inverte-se a ordem de composição do público. Registre-se a contribuição de sindicatos e federações dos químicos, petroleiros e metalúrgicos de diferentes regiões do país, além de departamentos intersindicais de estudos e pesquisas, entre outros.

Nota técnica

Em 2018 a equipe do projeto elaborou uma nota técnica sobre “Os desafios da Saúde e Segurança do Trabalho (SST) para uma produção segura com o uso de nanotecnologias”, aprovada pela gestão da Fundacentro, publicada no portal da instituição com a designação “Nota Técnica nº 1/2018/FUNDA-CENTRO”.

Esta publicação técnica tinha o objetivo de “[...] informar a sociedade sobre os possíveis riscos especialmente da nanotecnologia à saúde do trabalhador, destacar diversos aspectos a serem observados e recomendar ações para evitar ou ao menos minimizar os possíveis riscos advindos destas novas tecnologias” (FUNDACENTRO, 2018).

Este documento foi citado, referenciado ou republicado por portais de diversas associações e entidades, e referenciado em diversos trabalhos acadêmicos (ANAMT, 2018; Bruch e Alves, 2019; Revista Proteção, 2018; FACTREM 2S, 2018; Leite, 2018; TESD, 2018; SINDMETAL, 2018; Inteligência Ambiental, 2018; PATISEG, 2019; Bruch e Alves, 2019; Quevedo, 2019; Silva, 2020).

Esta nota técnica, assim como outras referências ao trabalho da Fundacentro em nanotecnologia, consta dos anais do 13º Seminário Internacional de Governança e Sustentabilidade, realizado na Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI – Itajaí, em outubro de 2018. Estas informações se encontram no capítulo: “Breves considerações acerca de sustentabilidade e precaução na produção e uso da nanotecnologia” de autoria do Dr. Guilherme Kirtschig. (Kirtschig, 2018). É importante ressaltar que, em 6 de julho de 2018 foi publicada a tradução em espanhol do Dr. Mauricio Berger da Nota Técnica da Fundacentro na Revista Digital Administración Pública y Sociedad (APyS, 2018).

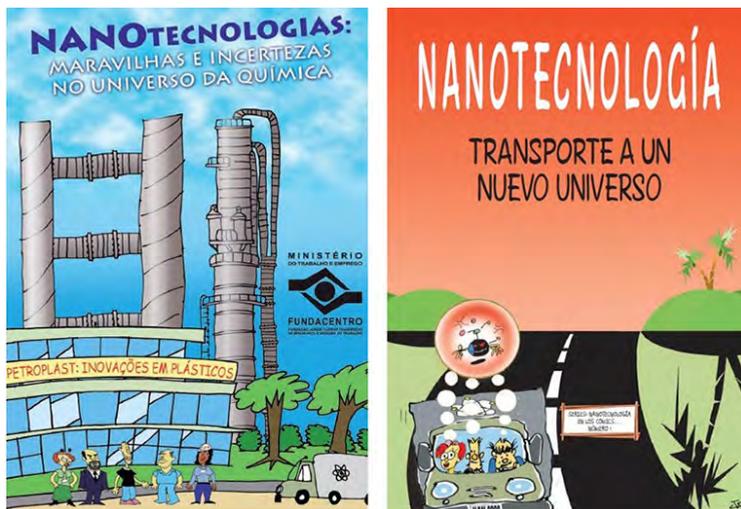
Histórias em quadrinhos (HQs)

Mais uma estratégia de comunicação científica pensada e desenvolvida pelos integrantes do projeto foi a preparação de histórias em quadrinhos (HQs), como uma ferramenta pedagógica para o trabalho de difusão de conhecimentos (ver figura 1).

Alexandre Custódio Pinto e Antonio Gracias Vieira Filho (Pinto & Vieira Filho, 2009) elaboraram um projeto para a produção destas HQs, no qual ressaltam que “[...] os quadrinhos (ou “arte sequencial”) permitem uma comunicação ágil com o leitor e seu conteúdo artístico é capaz de tornar inteligíveis mesmo as ideias mais complexas e de difícil visualização”. Eles ressaltam que é preciso seduzir o trabalhador para a grandiosa importância do tema dos impactos sociais, ambientais e éticos da nanotecnologia, com ênfase para o universo do trabalho e, para possibilitar a diversidade de posicionamentos e a troca de posições, um amplo debate de ideias em relação ao tema, os autores propuseram que em todas as HQs houvesse a participação de pelo menos três personagens centrais, todos trabalhadores, com posturas conflitantes em relação às novas tecnologias. A inspiração para a criação destes personagens foram os diálogos de Galileu (Galilei, 2011).

Os diálogos das HQs de nanotecnologia giram em torno de três personagens baseados em Simplício, Sagredo e Salviatti. Cada um deles representa uma visão de mundo no conflito entre abordagens aristotélicas e copernicanas e, ainda, uma terceira visão — intermediária — que promove a dúvida, o debate e a reflexão. A equipe do projeto propôs que cada HQ fosse dirigida a uma

Figura 1. Histórias em Quadrinhos.



atividade econômica e que cada um dos três personagens dos materiais formativos representasse uma postura diferente frente às novas tecnologias.

Para conseguir maior mobilidade e abranger mais situações que envolvessem a nanotecnologia, a ação dos personagens é ambientada em uma empresa transportadora. Em cada edição há uma tarefa da transportadora em que surgem os imprevistos que permitem o aprendizado e debate dos temas da nanotecnologia. As situações são como exemplos: a entrega de equipamentos em laboratórios, feiras e eventos científicos; transporte de pessoas; e/ou entregas em hospitais e em empresas que trabalham com nanopartículas ou desenvolvem processos nanotecnológicos.

Esta estratégia contou com a expertise dos pesquisadores do projeto e sindicalistas que participaram do projeto da Fundacentro e contribuíram nas escolhas dos temas e roteiros das HQs. Assim, foram produzidas seis HQs, sendo as quatro primeiras traduzidas para inglês e espanhol com os seguintes títulos originais: Nanotecnologia O Transporte para um Novo Universo – HQ1; Nanotecnologias: Maravilhas e Incertezas no Universo da Química – HQ2; Nanotecnologia: Um universo em construção – HQ3; Nanotecnologia: no campo – HQ4; Nanotecnologia no setor metalúrgico automotivo – HQ5 e Nanotecnologia no setor metalúrgico – fabricação de autopeças – HQ6. Estas publicações podem ser encontradas para livre acesso no portal da Fundacentro, desde que citada a fonte.

Um exemplo do alcance deste trabalho feito pela equipe do projeto é a publicação da Universidade Federal do Paraná (UFPR) feito por Quevedo e Eloisa (pp. 301 e 313, 2018) “Uma experiência de educomunicação inovadora: as histórias em quadrinhos sobre nanotecnologia produzida no Brasil” onde fazem uma análise das HQs da Fundacentro, do qual se extrai o seguinte:

As abordagens das HQs demonstraram perspectivas para além da dicotomia benefícios versus riscos, abrindo um leque de novas reflexões sobre capacitação e preocupação de trabalhadores, entendimentos sobre efeitos de nanoproductos, ausência de pesquisas sobre riscos e testes, entre outras problemáticas sociais, políticas e economicamente relevantes para a sociedade, os cientistas e as próprias empresas que já produzem com nanotecnologia. A perspectiva da educomunicação presente nas HQs busca esclarecer sobre o que é a nanotecnologia, as suas controvérsias quanto a riscos *Environment, Health and Safety* (EHS) e aspectos *Ethical, Legal, and Social Implications*³ (ELSI), levantando questionamentos sobre as consequências disto para a sociedade, de forma atraente e emancipadora. Nota-se que no Brasil, até o momento, esta é a primeira iniciativa pública e gratuita que se tem conhecimento que promoveu um enfoque mais reflexivo sobre os impactos da nanotecnologia para o público em geral, utilizando-se de uma linguagem descomplicada e inteligível a qualquer pessoa. Isto é aferido visto que não foram encontradas iniciativas similares sobre nanotecnologia nas plataformas governamentais brasileiras.

Em 2019, Juliana Correia Almeida, defendeu tese de doutorado no Programa de Pós-graduação em Sociologia da Universidade Federal de Sergipe, com o título “Para o mundo ver? Redes de pesquisa na divulgação científica e engajamento público na internet: o caso da rede nacional de nanotecnologia sociedade e meio ambiente – RENANOSOMA⁴”, onde faz inúmeras citações do trabalho da Fundacentro em nanotecnologia, com destaque para as histórias em quadrinhos (HQs).

As HQs elaboradas pela equipe do projeto foram citadas e reproduzidas em inúmeros portais, de sindicatos e organizações de trabalhadores, acadêmicos e de associações de profissionais de segurança e saúde do trabalho. Alguns exemplos: Portal dos trabalhadores do Sindicato dos Trabalhadores nas Indústrias Metalúrgicas, Mecânicas e Materiais Elétricos de Jaguariúna, Amparo, Pedreira, Serra Negra e Monte Alegre do Sul – SINDMETAL: “Lançada história em quadrinhos sobre nanotecnologia no setor metalúrgico” (SINDMETAL, s.d.); Portal da Federação dos Trabalhadores do Ramo Químicos da CUT do Estado de São Paulo (FETQUIM) (FETQUIM, 2012); O Sindicato dos Técnicos de Segurança do Trabalho no Estado de São Paulo (SINTESP) disponibilizou a HQ “Nanotecnologia no Setor Metalúrgico Automotivo” em sua página (SINTESP, 2017a); O sindicato dos Químicos do ABC publica em seu portal a matéria: “Rio+20: Sindicato participa da Rio NanoSummit 2012”, onde faz referência a uma HQ da Fundacentro e palestras proferidas sobre nanotecnologia por profissionais da entidade (Químicos ABC, 2012).

³ As siglas vêm do inglês: Environment, Health and Safety que significa Meio Ambiente, Saúde e Segurança e Ethical, Legal, and Social Implications que significa Questões Éticas, Legais e Sociais.

⁴ Sistema Integrado de Gestão de Atividades Acadêmicas (SIGA), São Cristóvão, 25 de Setembro de 2021.

Entrevistas e reportagens

Durante os 13 anos do projeto foram ministradas 220 palestras, (30% delas foram diretamente programadas ou contaram com a participação de alguma entidade sindical); realizadas 77 entrevistas, publicados 33 artigos e capítulos de livros em publicações nacionais e internacionais; coordenados e executados 28 eventos, ministrados inúmeros cursos e minicursos (ver figura 2).

Figura 2. Entrevistas e reportagens.



Fonte: Elaboração dos autores.

Em várias publicações da Confederação Nacional do Ramo Químico da CUT (CNQ-CUT) aparecem referências ao trabalho desenvolvido pelo projeto de nanotecnologia da Fundacentro. Há um destaque, por exemplo, na publicação “80 anos – Químicos do ABC”, organizada por Todeschini (2018), onde um item é dedicado à ação sindical em nanotecnologias, incluindo a referência a um seminário realizado em parceria com a Fundacentro, que intensificou o engajamento da categoria dos químicos sobre a necessidade de mais conhecimento sobre os impactos destas tecnologias na saúde dos trabalhadores.

Thomaz Ferreira Jensen, economista do DIEESE destaca em várias publicações e entrevistas o trabalho da Fundacentro no tema, fazendo muita referência à história em quadrinhos n.02, “Nanotecnologias: Maravilhas e Incertezas no Universo da Química”, da qual foi um dos autores, como material a ser usado em cursos de capacitação de membros da Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA), no tema nanotecnologia (Químicos ABC, 2010). No Brasil a norma regulamentadora número 5 (NR 5) exige que empresas de determinado grau de risco e a partir de certo número de trabalhadores, constitua uma CIPA, formada por trabalhadores da empresa (Brasil, 2019).

Cursos e seminários sobre nanotecnologia

Ainda no início do projeto, entre os dias 3 e 4 de outubro de 2007, a Fundacentro realizou o Seminário “Nanotecnologia, saúde dos trabalhadores, alimentos e impactos à sociedade e ao meio ambiente” em conjunto com DIESAT; Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA); Organização Regional Interamericana de Trabalhadores (ORIT); Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos (DIEESE); Intercâmbio Informações Estudos Pesquisas (IIEP) e a Rede de pesquisa em nanotecnologia, sociedade e meio ambiente (RENANOSOMA), esta última parceira do projeto desde seu início (Cristhina, 2007; Martins *et al.*, 2014).

Após este evento, pesquisadores da Fundacentro colaboraram na produção do texto “Apontamentos para um posicionamento sindical sobre os impactos éticos, sociais e ambientais da introdução de nanotecnologias nos alimentos, produtos e processos produtivos”, documento no qual os participantes “procuraram organizar as questões e problemas relativos aos impactos das nanotecnologias sobre os processos de trabalho, a organização e a capacitação dos trabalhadores” (Martins *et al.*, 2014).

Em dezembro de 2008, a Fundacentro organizou o “II Seminário Internacional Nanotecnologia e os Trabalhadores” em conjunto com RENANOSOMA; IIEP; DIESAT; ORIT; DIEESE; Centro de Referência em Saúde dos Trabalhadores de São Paulo (CEREST/SP) e Superintendência Regional do Trabalho e Emprego em São Paulo (SRTE/SP). Em 2010 a Fundacentro organizou o seminário “Simpósio internacional de Impactos das nanotecnologias sobre a Saúde dos trabalhadores e sobre o meio ambiente”, com a colaboração do CEREST/

SP, Conselho Regional de Química da IV Região (CRQ – IV), DIEESE, DIESAT, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca da Fundação Oswaldo Cruz (ENSP/FIOCRUZ), IIEP; Instituto Observatório Social (IOS) e RENANOSOMA. Em 2013 é realizado o Seminário “Nanotecnologia”, organizado pelo Sindicato Metalúrgico de São Paulo e Mogi das Cruzes e FUNDACENTRO. Já em 2015 foi realizado o seminário “Nanotecnologia: Saúde do Trabalhador e impactos ao Meio Ambiente” com apoio do Sindicato dos Petroleiros do Rio de Janeiro SINDIPETRO/RJ.

Para ilustrar esta robusta produção do projeto destacamos que foram ministrados cursos sobre a temática com a participação de milhares de trabalhadores e aqui segue a relação de alguns deles: (ver tabela 1).

Tabela 1. Cursos.

Ano	Curso	Cidade
2010	Nanotecnologia e os trabalhadores - Colaboração/Apoio - IOS, DIEESE e RENANOSOMA	São Paulo
	Nanotecnologia e Interações com a Agricultura e Comunidades Rurais - Colaboração/Apoio – FETACRE	Rio Branco
2012	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores - Sindicato dos Trabalhadores nas Indústrias da Construção e do Mobiliário	Chapecó
	Conceitos de nanotecnologia e impactos a saúde dos trabalhadores	Curitiba
	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores	São Paulo
2013	Nanotecnologias e outras novas tecnologias e impactos à saúde dos trabalhadores	Vitória
	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores	Curitiba
2014	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores	Florianópolis
2015	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores - Colaboração/Apoio - SINDIPETRO/NF	Rio de Janeiro
2016	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores - Colaboração/Apoio - RENANOSOMA, DIESAT, Sindicatos metalúrgicos de São Paulo, CNM/CUT	São Paulo
	Conceitos Básicos de Nanotecnologia e Possíveis Impactos à Saúde dos Trabalhadores e ao Meio Ambiente	Curitiba
2017	Conceitos de nanotecnologia e impactos à saúde dos trabalhadores	São Paulo
2018	Impactos à saúde dos trabalhadores das nanotecnologias e outras novas tecnologias	São Paulo
2019	Nanotecnologia, novas tecnologias e impactos na saúde do trabalhador.	São Paulo
	Conceitos de Nanotecnologia e Impactos à Saúde dos Trabalhadores	Belo Horizonte

Fonte: Elaboração dos autores.

Repercussões das atividades educacionais na academia e na sociedade

Destaca-se aqui que em quase todas as participações presenciais de pesquisadores da Fundacentro havia distribuição de exemplares das HQs, o que foi possível até o seu esgotamento, além da divulgação dos endereços eletrônicos de todas as publicações que poderiam ser baixadas no portal da instituição. Ressalta-se a tradução, publicação e distribuição em 2012 do folder “Nanotecnologia Segura no Ambiente de Trabalho – Uma Introdução aos Empregadores, Gerentes e Profissionais da Saúde e Segurança”, tradução institucional feita por integrantes do projeto de uma publicação original do *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH – Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional).

As atividades dos pesquisadores do projeto visavam interagir, através de ações do tipo curso, seminários, publicações originais e traduzidas, com a dimensão coletiva da comunicação científica, ou seja, não apenas a comunicação entre o cientista e sociedade, nem apenas com seus pares, mas também com grupos de pesquisa. Assim, a tradução do NIOSH; intercâmbio de informações com a Organização Mundial da Saúde (OMS); grupos não governamentais como a Rede Nanotecnologia, Sociedade e Meio Ambiente; grupos de estudo do Ministério público do trabalho, facilitavam no aprimoramento das informações levadas aos trabalhadores nas atividades educacionais. Isto levava os pesquisadores a construir outra base necessária para políticas públicas participativas na governança das tecnologias, a construção da dimensão da ciência como coisa pública (Pontes, 2017).

Foi através desta caminhada interativa com grupos de estudo e pesquisa inter-multidisciplinares que foi possível o desenvolvimento de instrumentos e linguagem adequada para alcançar trabalhadores de diferentes segmentos e classes da sociedade brasileira e um exemplo disso, são as HQs sobre as quais relatamos acima. Mas não apenas os trabalhadores foram alcançados por estas ações, a academia também foi influenciada e ensinou o surgimento de novas pesquisas e pesquisadores do assunto em diferentes áreas.

Vejamos alguns exemplos desta interação com grupos e pesquisadores, além de resultados das atividades educacionais. Em 2018, profissionais da Fundacentro ministraram um curso sobre nanotecnologia promovido pelo Ministério Público do Trabalho de Santa Catarina – MPT-SC e a Coordenadoria Nacional de Defesa do Meio Ambiente do Trabalho – CODEMAT que deu origem a uma matéria publicada no portal da Associação Catarinense de Medicina do Trabalho – ACAMT. (ACAMT, 2018) e (JusBrasil, 2018).

Em 2019, Bruch e Alves publicam o artigo “A Nanotecnologia e os Desafios da Gestão de Saúde e Segurança do Trabalho”, onde pode ser lido o seguinte comentário (Bruch e Alves, 2019): “[...] destaca-se no Brasil o papel exercido pela Fundacentro, que, desde 2006, iniciou um projeto de levar à sociedade informações acerca das nanotecnologias”.

Foram escritos diversos capítulos de livros editados por entidades sindicais, entre estes o livro “Trabalho e Saúde: tópicos para reflexão e debate” editado pelo DIESAT em 2008 foi feito o capítulo “Alguns impactos da nanotecnologia no mundo do Trabalho”. Livro “Ação sindical para o enfrentamento do risco químico no local de trabalho – um manual para sindicatos e organizações nos locais de trabalho” editado pela *International Federation of Chemical, Energy, Mine and General Workers’ Unions* (ICEM) e a *International Labour Foundation for Sustainable Development*. (SustainLabour) em 2010, foi produzido texto sobre “Incertezas de um risco emergente: as nanotecnologias” no capítulo 2 “Os riscos e os danos à saúde nos setores onde trabalhamos (e como controlá-los)”. Esta publicação integrava o projeto “Facilitar a Implementação do Enfoque Estratégico para a Gestão Internacional das Substâncias Químicas — SAICM — pelos trabalhadores e trabalhadoras no local de trabalho”. Em 2010 teve início a participação no projeto de “Nanotecnologia e Interações com a Agricultura e Comunidades Rurais” do IIEP que produziu o Guia de nanotecnologias para trabalhadores, disponível na Internet (ANAMT, 2015).

Inúmeras outras atividades como monografias, dissertações e teses foram influenciadas pelos trabalhos dos pesquisadores do projeto “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” desenvolvido pela Fundacentro. Além disso, livros e entrevistas contribuíram para o esclarecimento da população e para a melhor governança das nanotecnologias nas instâncias de discussão. Destacam-se aqui algumas destas contribuições.

Em junho de 2010 a socióloga Cibele Caroline Cavichiolo, em sua “Monografia apresentada ao curso de Ciências Sociais, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a conclusão do Bacharelado, área de Sociologia.” (Cavichiolo, 2010). Cita várias vezes o trabalho da Fundacentro em nanotecnologia, onde se destaca o texto:

Em minha análise, grande parte do material encontrado que permite ou inclui a Sociologia nessa discussão ou fomenta a discussão das implicações sociais do advento da nanotecnologia se devem a iniciativas da Fundacentro por meio de conferências, Simpósios, divulgação na ALL TV, juntamente ao IIEP – Intercâmbio, Informações e Estudos e Pesquisas.

Na dissertação de mestrado de Dilnei José Eidt, sobre “A fiscalização das normas regulamentadoras da segurança e saúde do trabalho no âmbito das microempresas e empresas de pequeno porte – MPE” defendida na Universidade Comunitária da Região de Chapecó – UNOCHAPECÓ, Curso de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Direito” em 2017, é citado inúmeras vezes o “Guia de nanotecnologia para trabalhadores”, publicado pelo IIEP, que contou com a colaboração da Fundacentro (Eidt, 2017).

Considerações finais

Do exposto, se pode identificar que o projeto “Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores” desenvolvido pela Fundacentro entre 2006 e 2019, alcançou como alvo principal a difusão de conhecimentos sobre os riscos ocupacionais oriundos da manipulação dos nanomateriais, por meio de duas frentes: (1) a produção de material didático orientativo ou de reflexão sobre o assunto e, (2) a discussão do tema e sua difusão através de palestras, seminários, cursos e participações dos técnicos do projeto em eventos de SST.

Em relação a produção de material orientativo, se destaca a produção de seis títulos de histórias em quadrinhos, quatro delas vertidas para a língua espanhola e inglesa, todas disponíveis para download gratuito no site da Fundacentro.

É importante destacar nesta iniciativa a participação das representações dos trabalhadores (sindicatos e outras organizações sindicais) e de demais interessados no desenvolvimento do material o que, por si só, aponta a estratégia utilizada ao longo do desenvolvimento do projeto, qual seja, o envolvimento especialmente dos trabalhadores na condução das discussões sobre o desenvolvimento tecnológico representado pelo uso de nanomateriais e seus impactos para a SST. Se um dos objetivos é propor a modificação da forma como são conduzidas as questões oriundas da introdução de novas tecnologias no mundo do trabalho, incluindo trabalhadores e sociedade em geral, nada mais justo do que iniciar esta mudança pela própria condução do projeto.

Em que pese a dificuldade de avaliar ou mensurar o alcance destas ações, a robusta produção de materiais educativos e técnicos sobre os impactos das nanotecnologias sobre a segurança e saúde dos trabalhadores, como já mencionado, indica a possibilidade de que os trabalhadores tenham hoje mais informações e subsídios para formar opiniões que possam contribuir na governança das nanotecnologias no Brasil. No que tange a difusão de conhecimentos estima-se que mais de 60.000 pessoas foram diretamente atingidas pelas participações em eventos, cursos, palestras e discussões sobre o assunto.

Desafortunadamente, não foram encontradas referências à inclusão dos trabalhadores nas discussões sobre o tema, pelo que é possível imaginar que mesmo dispondo do conhecimento necessário às discussões os trabalhadores ainda não sejam chamados (ou lhes é dado espaço) para participar da governança das nanotecnologias. Esta constatação não chega a surpreender, posto não haver ainda uma cultura generalizada no ambiente organizacional que de fato inclua a classe trabalhadora nas decisões corporativas, mesmo que tais decisões impliquem em risco, nem sempre desprezíveis, para os próprios trabalhadores.

Ninguém pode (ou deve) opinar sobre o que não conhece, assim neste cenário o primeiro passo foi dado: a difusão de conhecimentos para os trabalhadores sobre os impactos das nanotecnologias no mundo do trabalho,

como mostra o levantamento alvo deste documento. A equipe do projeto e a Fundacentro continuarão empreendendo esforços para que, mais do que conhecer, os trabalhadores possam de fato participar, se convidados, na governança das nanotecnologias no Brasil.

Referências

- Arns, R. e Neumann, L. (2015). *Parceiros voluntários*. Parceiros voluntários #só juntos. <https://www.parceirosvoluntarios.org.br/governanca-participativa/>
- Associação Catarinense de Medicina do Trabalho – ACAMT. (2018). *Curso nanotecnologia e saúde do trabalhador*. <http://www.acm.org.br/acm/acamt/index.php/informativos/1325-acamt-presente-no-curso-nanotecnologia-e-saude-do-trabalhador>
- Associação Nacional de Medicina do Trabalho – ANAMT. (2013). *Audiência pública na Câmara debate nanotecnologia*. <https://www.anamt.org.br/portal/2013/01/11/audiencia-publica-na-camara-debate-nanotecnologia/>
- Associação Nacional de Medicina do Trabalho – ANAMT. (2015). *Guia de nanotecnologias para trabalhadores*. http://www.anamt.org.br/site/upload_arquivos/legislacao_2015_251120151338147055475.pdf
- Associação Nacional de Medicina do Trabalho - ANAMT. (2018). *Desafios da SST para uma produção segura com o uso de nanotecnologia*. <https://www.anamt.org.br/portal/2018/04/03/desafios-da-sst-para-uma-producao-segura-com-o-uso-de-nanotecnologia/>
- Berger, M. e A Filho, A. G. B. (2021). Nano-governance, nano-regulación y nanociudadanía? Un análisis de escenarios normativos en Brasil y Argentina. *Mundo Nano*, 15(28): 1e-26e, enero-junio 2022. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69659>
- Bevir, M. (2012). *Governance: A very short introduction*. Frist edition. USA: Oxford University Press. https://books.google.com.br/books?id=ozjcwIfhoO8C&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Brasil, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. (2020b). PORTARIA Nº 1.990, DE 5 DE MAIO DE 2020. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-1.990-de-5-de-maio-de-2020-257205460>
- Brasil, Ministério da Economia. (2016). *I Plenária do Fórum – 2009*. <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/mdic/comercio-exterior/i-plenaria-do-forum-2009>
- Brasil, Ministério da Economia. (2019). NR 5 - COMISSÃO INTERNA DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES. <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-5-nr-5>
- Bruch, T. F. A. e Alves, T. F. (2019). *A nanotecnologia e os desafios da gestão de saúde e segurança do trabalho*. <https://ambitojuridico.com.br/cadernos/direito-do-trabalho/a-nanotecnologia-e-os-desafios-da-gestao-de-saude-e-seguranca-do-trabalho/>
- Cavichiolo, C. C. (2010). *As implicações do desenvolvimento da nanotecnologia no mun-*

- do: Um olhar sociológico*. Bacharelado área sociologia, Ciências Sociais, Universidade Federal do Paraná. <http://www.humanas.ufpr.br/portal/cienciassociais/files/2012/06/CAVICHIOLO-Cibele-Caroline1.pdf>
- Confederação Nacional do Trabalhadores Metalúrgicos – CNTM. (2016). *Dirigentes metalúrgicos participam de curso na Fundacentro sobre nanotecnologia e impactos à saúde*. <http://cntm.org.br/dirigentes-metalurgicos-participam-de-curso-na-fundacentro-sobre-nanotecnologia-e-impactos-a-saude/>
- Confederação Nacional dos Metalúrgicos da CUT – CNM/CUT. (2012). *Nanotecnologia pode causar danos à saúde dos metalúrgicos*. <https://www.cnmcut.org.br/conteudo/nanotecnologia-pode-causar-danos-a-saude-dos-metalurgicos>
- Cristhina, E. (2007). *Os desafios de uma inovação tecnológica*. <https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/assuntos/noticias/noticias/2007/10/os-desafios-de-uma-inovacao-tecnologica>
- Dingwerth, K. (2004). *Democratic governance beyond the State: Operationalising an idea*. Global Governance Working Paper. https://www.researchgate.net/publication/237250898_Democratic_Governance_beyond_the_State_Operationalising_an_Idea
- Dodd, J. D. e Boyd, M. H. (2000). *Capacity building: Linking community experience to public policy*. Population and Public Health Branch, Atlantic Regional Office, Health Canada. https://carleton.ca/cure/wp-content/uploads/capacity_2000_e.pdf
- Eidt, Dilnei José. (2017). *A fiscalização das normas regulamentadoras da segurança e saúde do trabalho no âmbito das microempresas e empresas de pequeno porte – MPE*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Direito (Mestrado Acadêmico) Universidade Comunitária da Região de Chapecó – UNOCHAPECO. https://bibliotecadigital.economia.gov.br/retrieve/9cc-07354-f88b-4f38-90b3-8d97483358fa/DILNEI_JOSE_EIDT.pdf
- Federação dos Trabalhadores do Ramo Químico da CUT – FETQUIM. (2012). *Nanotecnologias: maravilhas e incertezas no universo da química*. <http://fetquim.org.br/system/uploads/publication/197cd4096afdc24d848825a196b55eac/file/16-05-2012-nanotecnologias-maravilhas-e-incertezas-no-universo-da-quimica.pdf>
- Federação dos Trabalhadores do Ramo Químico da CUT – FETQUIM. (2017). *Fundacentro promove curso sobre nanotecnologia e os impactos à saúde dos trabalhadores*. <http://fetquim.org.br/noticias/fundacentro-promove-curso-sobre-nanotecnologia-e-os-impactos-a-saude-dos-trabalh-ce0a/>
- Federação dos Trabalhadores do Ramo Químico da CUT – FETQUIM. (2015). *Economista do DIEESE fala de nanotecnologia no Ramo Químico*. <http://fetquim.org.br/noticias/economista-do-dieese-ressalta-acao-sindical-inovadora-sobre-nanotecnologia-no-ra-f5d5/>
- Fundacentro Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho – FUNDACENTRO. (2018). Nota Técnica nº 1/2018/FUNDACENTRO – *Os desafios da Saúde e Segurança do Trabalho (SST) para uma produção segura com o uso de nanotecnologias*. <http://antigo.fundacentro.gov.br/arquivos/projetos/Nota%20tecnica%20%2001-2018%20Corrigida%20e%20Revisada.pdf>

- Galilei, G. (2011). *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano*. 1a edição. Coleção Estudos sobre a Ciência e a Tecnologia. Editora 34.
- Grupo de Pesquisa CNPq Tecnologias Emergentes e Sociedade – TESD. (2018). *Lançada a primeira guia de trabalho seguro com nanotecnologia no Brasil*. <https://nanotecnologiasociedade.weebly.com/blog/category/fundacentro>
- Inteligência Ambiental. (2018). Nota Técnica nº 1/2018/FUNDACENTRO. <http://www.inteligenciaambiental.com.br/arquivos/sila/fnttecmete1-18.pdf>
- Invernizzi N.; Foladori, G. e Quevedo J. P. de. (2019). Do nano-boom à paralisação: a trajetória da política brasileira de nanotecnologia. *Ciências Sociais Unisinos*, 55(1): 24-34, janeiro/abril 2. <https://doi.org/10.4013/csu.2019.55.1.03>. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/938/93863726003/html/index.html>
- Kirtschig, G. (2018). *Breves considerações acerca de sustentabilidade e precaução na produção e uso da nanotecnologia*. Apresentado no 13º Seminário Internacional de Governança e Sustentabilidade, Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, outubro de 2018. <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/acts/article/view/14631/8338>
- Leite, L. P. (2018). *Saúde e segurança do trabalho na indústria 4.0: nanotecnologia, o futuro presente*. <https://www.sesi-ce.org.br/blog/saude-e-seguranca-do-trabalho-na-industria-4-0-nanotecnologia-o-futuro-presente/>
- Martins, P. et al. (2014). *Risco nanotecnológico e ação sindical no Brasil*. Trabalho apresentado no IX Seminário do Trabalho: Trabalho, Educação e Neodesenvolvimentismo. Marília. <https://ptdocz.com/doc/262383/risco-nanotecnol%C3%B3gico-e-a%C3%A7%C3%A3o-sindical-no-brasil>
- Pinto A. C. e Vieira Filho, A. G. (2009). *Projeto da Série Nanotecnologia em quadrinhos – (HQ)-9. Fundacentro*. http://antigo.fundacentro.gov.br/arquivos/projetos/hq_nanotecnologia%20projeto%20Alexandre.pdf
- Plentz F. e Fazzio, A. (2013). Considerações sobre o Programa Brasileiro de Nanotecnologia. *Cienc. Cult.*, 65 (3): 23-27. <https://doi.org/10.21800/S0009-67252013000300010>
- Pontes, Jorge M. (2015). *O tripartismo e as políticas públicas de segurança e saúde no trabalho: o caso da indústria de calçados infantis*, 127 f. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas), Universidade de Mogi das Cruzes.
- Pontes, Jorge M. (2017). Nanotecnologia, inovação, comunicação e mercado de trabalho. In: *Marketing, comunicação, educação e inovação: novos olhares*. ECA-USP, 173-194.
- Pontes, J. M., & Arcuri, A. S. A. (2018). A manufatura avançada entre dois extremos. *Administración Pública y Sociedad (APyS)*, (5): 26-37.
- Portal Nacional do Direito do Trabalho – JusBrasil. (2018). *MPT promove curso sobre impactos da nanotecnologia no trabalho*. <https://pndt.jusbrasil.com.br/noticias/561894071/mpt-promove-curso-sobre-impactos-da-nanotecnologia-no-trabalho?ref=serp>
- Prevenção de acidente no trabalho, incêndio e segurança – PATISEG. (2019). *Programa Nanotecnologia do Avesso completa dez anos e Fundacentro é parceira*. <https://patisegnoticias.com.br/2019/01/10/programa-nanotecnologia-do-avesso-completa-dez-anos-e-fundacentro-e-parceira/>

- Quevedo, J. e Eloisa, E. L. (2018). Uma experiência de educomunicação inovadora: as histórias em quadrinhos sobre nanotecnologia produzidas no Brasil. *Revista Latinoamericana de Comunicación*, 138: 273-298, agosto-noviembre. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6815702.pdf>
- Quevedo, J. P. de. (2019). *A retórica sobre inovação, impactos, regulação e riscos na política pública de nanotecnologia do Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Paraná. <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/60391/R%20-%20T%20-%20JOSEMARI%20POERSCHKE%20DE%20QUEVEDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Químicos ABC. (2010). *Nanotecnologia no ramo químico é tema de HQ*. <http://quimicosabc.org.br/noticias/nanotecnologia-no-ramo-quimico-e-tema-de-hq-1016/>
- Químicos ABC. (2012). *Rio+20: Sindicato participa da Rio Nano Summit*. <http://quimicosabc.org.br/print/?url=http://quimicosabc.org.br/noticias/rio-20-sindicato-participa-da-rio-nanosummit-2012-1403/>
- Revista Administración Pública y Sociedad APyS. (2018). *Los desafíos en salud y seguridad del trabajo (SST) para una producción segura con uso de nanotecnología*. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/APyS/article/view/20573/20262>
- Revista Proteção. (2018). *Desafios da SST para uma produção segura com o uso de nanotecnologia*. <https://protecao.com.br/geral/desafios-da-sst-para-uma-producao-segura-com-o-uso-de-nanotecnologia/>
- Ribeiro, A. (2013). *Luisinho participa de reunião do Comitê de Nanotecnologia*. <https://metalurgicos.org.br/noticias/luisinho-participa-de-reuniao-do-comite-de-nanotecnologia/>
- Schmidt, J. R. A. (2017). *Avaliação de risco envolvendo a manipulação de nanomateriais em um laboratório de pesquisa*. Dissertação submetida ao programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Serafim, E., Quelhas, O. L. G. e Alledi, C. (2010). *Histórico e fundamentos da governança corporativa – contribuições para a sustentabilidade das organizações*. VI Congresso Nacional de excelência em Gestão. https://www.inovarse.org/sites/default/files/T10_0261_1459.pdf
- Silva, A. P. da. (2020). *Novo Post Da Série Impactos Das Mudanças No Trabalho Sobre A Saúde Dos Trabalhadores*. <https://rsdata.com.br/sst/novo-post-da-serie-impactos-das-mudancas-no-trabalho-sobre-a-saude-dos-trabalhadores/>
- Sindicato da Indústria de Produtos Farmacêuticos no Estado de São Paulo – SINDUSFARMA. (2021). *Convenção coletiva de trabalho – FETQUIM – CUT – setor farmacêutico – 2021/2023*. https://sindusfarma.org.br/uploads/Dancarla/Osasco_CCT_2021_2023_FETQU.pdf
- Sindicato dos Engenheiros do Estado de São Paulo - SEESP. (2017). *Fundacentro discute os impactos das novas tecnologias no trabalho*. <https://www.seesp.org.br/site/imprensa/noticias/item/15764-fundacentro-discute-os-impactos-das-novas-tecnologias-no-trabalho.html>
- Sindicato dos Metalúrgicos de Osasco e região. (2019). *Fundacentro promove curso sobre nanotecnologia e seus impactos*. <http://www.sindmetal.org.br/106659-2/>

- Sindicato dos Técnicos de Segurança do Trabalho no Estado de São Paulo – SINTESP. (2017a). *História em quadrinhos sobre nanotecnologia*. <https://www.sintesp.org.br/downloads/downloads-diversos/historia-quadrinhos-sobre-nanotecnologia>
- Sindicato dos Trabalhadores em Pesquisa, Ciência e Tecnologia – SP – SINTPq. (2016). *Nanotecnologia será abordada no Fórum Social Mundial*. <http://www.sintpq.org.br/index.php/blog/item/4747-nanotecnologia-sera-abordada-no-forum-social-mundial>
- Sindicato dos Trabalhadores nas Indústrias Petroquímicas de Porto Alegre e Triunfo/RS – SINDIPOLO. (2018). Em Dia Boletim Informativo N°1872. http://www.sindipolo.org.br/wp-content/uploads/2018/07/EM-DIA-1872_final.pdf
- SINDMETAL. (2018). *Portal dos trabalhadores. Impactos das nanotecnologias na saúde dos trabalhadores foi discutido no CTN Reunião na CTH discute nanotecnologia*. <http://portaldostrabalhadore.com.br/impactos-das-nanotecnologias-na-saude-dos-trabalhadore-foi-discutido-no-ctn-reuniao-na-cth-discute-nanotecnologia/>
- Todeschini, R. (2018). *80 anos Químicos do ABC*. Sindicato dos trabalhadores nas indústrias químicas e outras do ABCDMRPRG. 1a edição. Santo André: NSA Gráfica. <http://online.fliphtml5.com/behn/tjtx/#p=1>
- Vasconcellos, L. C. F.de et al. (2021). *Saúde do trabalhador em tempos de desconstrução: caminhos de luta e resistência*. 1a edição. Centro Brasileiro de Estudos de Saúde (CEBES). http://www.asfoc.fiocruz.br/portal/sites/default/files//almanaquest_-_web.pdf

Nano-governance, nano-regulación y, ¿nano-ciudadanía? Un análisis de escenarios normativos en Brasil y Argentina[◇]

Nano-governance, nano-regulation and nano-citizenship? An analysis of normative scenarios in Brazil and Argentina

Mauricio Berger*[†] Airton Guilherme Berger Filho**

ABSTRACT: The work presents advances in our research on nanotechnology development in Brazil and Argentina, with an analysis focused on its governance at international and national scales. By governance we understand a systemic function, of modulation and compatibility of public-private organizational formats, norms, public policies, partially overlapping or in collision. The metamorphosis observable in the new regulatory tendencies speaks to us of changes in the state bureaucratic structures, and in the form of law to regulate in matters that concern the protection of health and the environment, and the exercise of citizenship in the face of nanotechnologies. Methodologically, we identified and compiled documentary and legal sources and interviews with public agents, academics, professionals (industry, health, occupational safety) and members of civil society organizations. With these inputs we carried out a descriptive and reconstructive analysis of regulatory scenarios in both countries, theoretically framed in the theory of governance. Our first working hypothesis: the distortions and substitution of democratic-representative mechanisms that are produced by the expansion of governance have the effect of modulating the modern state structure of the law, and as a corollary, they place a series of obstacles in the way of citizens' exercise of their rights and participation in public decisions about the use and impacts of nanotechnologies.

KEYWORDS: nanotechnologies, governance, citizenship, precautionary principle, regulation, regulatory scenarios.

RESUMEN: El trabajo presenta avances de una investigación sobre el desarrollo nanotecnológico en Brasil y Argentina, con un análisis enfocado en su *governance* a escalas internacional y nacional. Por esta entenderemos una función sistémica: estabilización y compatibilización de formatos organizacionales público-privados, normas, políticas públicas, prácticas, parcialmente superpuestos o en colisión. La metamorfosis observable en las nuevas tendencias regulatorias nos habla de cambios en las estructuras burocráticas estatales, y en la forma de ley para regular en asuntos que conciernen la protección de la salud y el ambiente, y el ejercicio ciudadano frente a las nanotecnologías. Metodológicamente, identificamos y recopilamos fuentes

Recibido: 30 de septiembre de 2020.

Aceptado: 5 de noviembre de 2020.

[◇] Agradecemos las observaciones del dictamen que nos permitieron corregir y mejorar el artículo.

* Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Facultad de Ciencias Sociales.

** Universidade de Caxias do Sul, Brasil. Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental.

[†] Autor de correspondencia: mauricio.berger@unc.edu.ar



documentales, legales y entrevistas a agentes públicos, académicos, profesionales de distintos sectores (industrial, salud, seguridad del trabajo) y representantes de organizaciones de la sociedad civil. Con estos insumos realizamos un análisis descriptivo y reconstructivo de escenarios normativos en ambos países, enmarcado teóricamente en la teoría de la *governance*. Nuestra primer hipótesis de trabajo: las distorsiones y el debilitamiento de los mecanismos democrático-representativos que se producen por la expansión de la *governance* tienen como efecto la modulación de la estructura estatal moderna de la ley, y, como corolario, ponen al ejercicio ciudadano frente una serie de obstáculos para la protección de derechos y la participación en decisiones públicas sobre uso e impactos de las nanotecnologías.

PALABRAS CLAVE: nanotecnologías, *governance*, ciudadanía, principio precautorio, regulación, escenarios normativos.

Introducción

Los desarrollos nanotecnológicos empiezan a cobrar impulso entre las décadas de los años 90 y la primera del 2000, con la promesa de múltiples beneficios, desde eficientes instrumentos para la detección y tratamiento de enfermedades mediante nanosensores, a sistemas portadores de fármacos (biodistribución), agricultura de precisión (por ejemplo, plantas y semillas inteligentes), nuevos materiales para ser usados en la industria y la construcción, y métodos de remediación ambiental, por mencionar apenas algunos; los productos de la innovación nanotecnológica están imbuidos en una narrativa de progreso técnico sin precedentes.

Siguiendo a Wullweber (2015), se trataría de una amplia estrategia para los Estados industrializados en cuanto a criterios competitivos, que no debe ser entendida como una tecnología en sí sino, de forma más comprehensiva, como una estrategia de innovación tecno-socio-política. En palabras del autor, una *carrier force*, para resolver problemas socioeconómicos, en un contexto de mercados de alta tecnología, economía basada en el conocimiento y la presión de la competitividad internacional (Wullweber, 2015: 46). A través de las tecnologías emergentes y la llamada convergencia tecnológica nano-bio-info-cogno¹ los Estados parecen tener un papel clave en la generación de capacidades innovadoras y de competencias técnicas.

Mientras tanto, el campo de debates sobre la regulación de estos desarrollos y sus diversos efectos y/o impactos, no corre tan rápido en comparación con el *treadmill of production* o cinta de producción (Gould, 2015), la premura de la salida al mercado y el patentamiento. A falta de un marco legal nano-específico, el escenario se caracteriza por una dispersión normativa y por tendencias regulatorias que no tienen ni la rigidez ni los esquemas de sanción y obligatoriedad de las leyes en su forma estatal, tal como las conocemos en el marco de sociedades industriales.

¹ El informe *Converging technologies for improving human performance: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science*, publicado en 2002 por la National Science Foundation, y con la edición de Roco, Mihail C. y Bainbridge, William Sim, ha sentado buena parte del debate sobre convergencia tecnológica.

Las principales directrices y recomendaciones provienen de organismos como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) o la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés). Por su parte, las agencias reguladoras de países y bloques económicos centrales, también promueven políticas de regulación basadas en estricta evidencia científica para el análisis del riesgo (Kuzma y Roberts, 2016; Lamprou y Hess, 2016), frente al llamado a otro marco de políticas, como aquellas que sostienen una evaluación basada en el principio precautorio y abogan desde este lugar por un marco societal de evaluación de los riesgos de las nanotecnologías. Algunos desarrollos en este sentido han propuesto inclusive un modelo que integra dimensiones éticas, legales, sociales y participativas (ELSA, por sus siglas en inglés: ethical, legal, social aspects), ampliando con ello no solo los diferentes temas vinculados, sino también perspectivas interdisciplinarias (Delgado Ramos, 2013; Patenaude *et al.*, 2015; Porcari *et al.*, 2019).

Cabe señalar que en la última década, académicos en América Latina han generado antecedentes de investigaciones en la temática de *governance*, regulación y participación de la sociedad civil en temas de nanotecnología (Martins y Dulle, 2008; Delgado Ramos, 2014; Martins, 2014; Foladori e Invernizzi, 2015; Engelmann y Santos Martins, 2017; Saldívar Tanaka, 2019 y 2020).

En este contexto académico, nuestra contribución abreva principalmente de una sociología política y jurídica, que parte de la descripción de redes normativas, político-institucionales y epistémicas, para reconstruir este complejo entramado inter-legal, inter-contextual, y multi-actoral. Aquí, el concepto clave y polisémico como el de *governance*² viene a englobar tanto una definición que da cuenta de una nueva modalidad de gestión de lo político, caracterizada por una forma de diseño y gestión de políticas en redes descentralizadas, multi-actorales y multi-escalares, que resultarían más dinámicas y eficientes en relación con las tradicionales formas estatales. Dentro de los distintos abordajes de la noción, de la que damos cuenta en este artículo, profundizamos en los esbozos de una teoría crítica de la *governance*. Esta señalaría la función sistémica de la *governance* para asegurar la estabilización, compatibilización y modulación de conflictos entre los elementos que configuran la referida complejidad institucional. También, este enfoque nos permite analizar tanto los cambios a nivel del Estado y sus estructuras burocráticas regulatorias, por la emergencia de otras estructuras intermediarias, o de *dispositivos* que cumplen dicha función sistémica. *Soft law*, comitología, asociatividad pú-

² Utilizamos el término inglés *governance* en lugar de su traducción al español gobernanza, para mantener la referencia a su historia conceptual anglosajona. También, porque más allá del extendido uso del concepto en español, en la literatura académica y especialista, identificamos que gobernanza ha sido traducida con una marca de reconfiguración lexical, por el contexto de las políticas que los organismos internacionales de crédito han promovido en América Latina, junto a la teoría de la nueva gerencia pública. Intentamos, en este sentido, diferenciar las semánticas y traducciones del término en el entramado de redes conceptuales y contextos discursivos (Duso, 2019).

blico-privada, códigos voluntarios, responsabilidad social empresarial, entre otras, fungen como correas de transmisión y frenos, al decir de Kjaer (2010a), entre diversos órdenes normativos, regulatorios, legales, de participación como los que describiremos y analizaremos en este artículo. Ya en las primeras conceptualizaciones de la *governance*, Mayntz (2006) advertía sobre los déficits de legitimidad democrática y de *accountability*; por ello, un enfoque crítico en la *governance* intenta mostrar sus límites en lo que refiere no solo cuestiones como inclusividad y paridad participativa de dichas estructuras sino, y especialmente, a la vigencia, garantía y protección de derechos.

En consecuencia, frente a este despliegue de los dispositivos de *governance*, podemos apreciar los límites y posibilidades en la elaboración de legislación en asuntos que conciernen a la protección de la salud y el ambiente y —correlativamente— a las transformaciones en el ejercicio ciudadano frente a las nuevas tecnologías (la protección de la salud de trabajadores que manipulan nanomateriales, o de consumidores que los incorporan en su vida cotidiana en los nuevos productos), es decir, la capacidad de la ciudadanía de incidir en la pauta del cambio tecnológico (Malsh *et al.*, 2015).

En relación con la estructura del artículo luego de esta introducción, ampliamos, en primer lugar, el uso que hacemos del concepto *governance*, situándolo en algunos ejemplos de escenarios normativos globales. En segundo lugar, saltamos a la escala nacional, para abordar los escenarios normativos en Brasil y Argentina, en los que marcamos dos claves de lectura: las políticas de incentivos y los intentos de generar legislación y regulación nano-específicas. En un tercer apartado, nos detenemos en algunas consideraciones sobre los límites y posibilidades del ejercicio ciudadano en relación con los usos e impactos de las nanotecnologías.

Metodología

Nuestra investigación ha procedido mediante la identificación, recolección y análisis de fuentes documentales, legales, bibliográficas, y entrevistas con agentes públicos, sector académico, profesionales y miembros de organizaciones de la sociedad civil involucradas en la problemática.³ Con estos insu- mos realizamos un análisis situado de prácticas de diversos actores en red, entramados institucionales transescalares que convergen en escenarios normativos (Delmas-Marty, 2004). Entendemos por tales, aquellos paisajes del derecho, que de la linealidad pasan a formas más complejas, con la retirada de marcos rígidos y el desplazamiento de líneas en el ordenamiento jurídico, sus operadores y prácticas, sin significar una descomposición, sino imágenes de jerarquías discontinuadas, inversas, pirámides inacabadas.

³ Por acuerdo de confidencialidad con las y los entrevistadas/os, no se presentan sus nombres, solo se menciona su vínculo institucional.

El énfasis en la literatura revisada en la fragmentación, diferenciación, separación y autorreferencia entre estos escenarios normativos, sus organizaciones y actores públicos y privados (Teubner, 2012; Blome *et al.*, 2016; Kjaer, 2010a) genera una serie de problemas en cuanto a la forma en que pueden ser reconstruidas —teórica y empíricamente— las interconexiones e interferencias. Entendemos la noción de reconstrucción como aquella fase expositiva de una estrategia de investigación, inscrita en una teoría crítica, donde la aspiración es hacer visibles los marcos institucionales, intersubjetivos, multiescalares e intercontextuales en cada uno de los contextos analizados. Por ello, la descripción de las complejas matrices o marcos de acoplamientos/ensamblajes de escenarios normativos nos permite acrecentar las posibilidades de análisis.

Nuestras hipótesis de trabajo sostienen que las distorsiones y el debilitamiento de los mecanismos democrático-representativos estatales, que se producen por la expansión de la *governance* tienen como efecto la modulación de la estructura estatal moderna de la ley. Como corolario, ponen al ejercicio ciudadano frente a una serie de obstáculos para la protección de derechos, ambientales, sanitarios, y de participación en las decisiones sobre los impactos de las tecnologías emergentes. En relación con los casos de estudio, tanto en Argentina como en Brasil, advertimos, además, una marcada preeminencia de incentivos para alentar la innovación nanotecnológica, en desbalance respecto a un marco de principio precautorio⁴ que estudie, evalúe y administre sus riesgos, sus efectos adversos y las externalidades negativas.

Notas sobre nuestro uso situado del concepto de *governance*

El concepto *governance* tiene un uso extendido en los análisis politológicos y del ámbito de las políticas y administración pública. Dicho uso da cuenta de una nueva modalidad de gestión de lo público, aparentemente más eficiente y democrática, con recursos que dinamizarían el rol del Estado para la resolución de los asuntos colectivos mediante redes decisionales mixtas más allá de las estructuras burocráticas y jerárquicas del Estado (Rosenau, 2000; Rhodes, 2007). En América Latina, la difusión del término traducido como gobernanza ha tenido la impronta de los desarrollos latinoamericanos de la ad-

⁴ En su formulación, el principio precautorio considera que cuando una actividad amenaza con dañar la salud humana o el medio ambiente, deben adoptarse medidas de tutela anticipadas y pertinentes, aún cuando todavía no se hayan establecido plenamente y de modo científico las relaciones de causa-efecto. Como planteamos en las conclusiones, el principio precautorio debe entenderse no solo epistémicamente sino también en tanto que sistema de razonamiento público, sea formalizado parlamentariamente, o en la opinión pública que promueve la plataforma comunicativa de organizaciones de la sociedad civil en relación con los riesgos asociados con las nanotecnologías.

ministración pública, la nueva gestión pública y el neoinstitucionalismo (Aguilar Villanueva, 2007; Burgos, 2009; Cao *et al.*, 2016).

En tanto que categoría política —tanto conceptual como práctica—, la noción se aplica a distintos sectores o áreas de intervención o sistémicamente; *governance* agroalimentaria, del agua; *governance* de la Internet, de las tecnologías emergentes, entre otras. Para los fines de nuestro artículo, una *governance* de las nanotecnologías, que incluya la gestión de la innovación, la regulación de aspectos ambientales y sanitarios, y el análisis y gestión del riesgo (Bosso, 2010; Hull y Bowman, 2014). En este sentido proponemos también el uso del término de *nano-governance*.

Presentamos para ello, primeramente, algunos ejemplos de escenarios normativos globales, de modo de contribuir a una comprensión situada, imbuída en contextos particulares. Cuando hablamos de *governance* de las nanotecnologías, destacamos dos organismos internacionales en el escenario normativo global respecto del establecimiento de pautas regulatorias y para la supervisión de procesos que utilizan nanomateriales. Una de ellas, la OCDE, establece normas de seguridad y exige el sondeo de los gobiernos miembros, sobre estudios de rutas de exposición a lo largo de su ciclo vital, recomendaciones para comercializar productos nano con datos para proteger la salud y el ambiente, entre otros aspectos (Kearns *et al.*, 2009). A través de su Working Party on Manufactured Nanomaterials (WPMN), la OCDE también establece una base de datos internacional para informar y evaluar riesgos, estándares para la evaluación de nanotoxicidad, programas voluntarios para la cooperación en temas de investigación y regulación, no solo con los países miembros y asociados, sino también con las agencias internacionales que establecen estándares sanitarios y ambientales, tales como la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

El segundo organismo que sobresale por la centralidad de su protagonismo global, es la ISO que promueve el aseguramiento de buenas prácticas y certificación de calidad mediante normas voluntarias. Este organismo crea en 2005 su comité técnico con el objetivo de normalizar el uso de nanotecnologías (ISO TC 229) en aspectos que hacen al control de la materia y sus propiedades fisicoquímicas en escala nanométrica, definiendo términos, nomenclaturas, metodologías y modelos de pruebas, clasificación y etiquetado, principios de seguridad en el ámbito laboral, sustentabilidad y buenas prácticas, y gerenciamiento del riesgo (ISO, 2011).⁵

⁵ Merece un artículo aparte la estructura de gobierno de las ISO y su ruta para la elaboración de normas (Engelmann y Martins, 2017), entendidas como documentos técnicos basados en evidencia científica. También la existencia de distintos grupos de trabajo en subtemas específicos: terminología, medición y caracterización, aspectos ambientales, salud y seguridad laboral, especificación de materiales, productos y aplicaciones. Con 65 normas publicadas y 45 en desarrollo, la estructura de las ISO se impone como marco normativo de referencia global.

Continuando con los ejemplos de *governance* a escala global, cabe señalar las instituciones de los países y bloques económicos que producen normativa. La Agencia Europea que regula la industria química a nivel comunitario (European Chemical Agency, ECHA), a través de su reglamento de procedimientos para el registro, evaluación, autorización y restricción de químicos (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, REACH) (Kuraj, 2019). El REACH provee directivas y recomendaciones conformando un cuadro legislativo comunitario en materia de sustancias químicas, impone la carga de la prueba a las empresas químicas, las cuales deben identificar, gestionar y comunicar los riesgos asociados con los productos/ sustancias fabricados y comercializados en el mercado común europeo. Para el caso de las nanotecnologías, iniciativas de plataformas de investigación y desarrollo tales como el Observatorio de Nanomateriales de la ECHA, o el ya finalizado proyecto NANOREG,⁶ han aportado antecedentes respecto de la definición del tamaño (nanomateriales que teniendo la misma composición química pueden tener diferentes efectos dependiendo del tamaño), la tendencia al agrupamiento por nanoformas (discutido porque semejanzas estructurales no pueden ser usadas como justificación de agrupamiento, generando efectos de “caja negra”, formas más peligrosas que otras). Estos insumos contribuyen al establecimiento de regulaciones para el etiquetado y embalaje, clasificación de su peligro para el ambiente, la salud, esto es, las características toxicológicas de los nanomateriales.⁷

Por su parte, las agencias reguladoras en Estados Unidos, en el marco de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI-National Nanotechnology Initiative), destinan parte de la inversión federal a investigar las implicaciones sociales y ambientales de la nanotecnología, incluyendo sus efectos en la salud humana, el medio ambiente y la sociedad. La Agencia Regulatoria de Alimentos y Drogas (Food and Drug Administration-FDA) no establece normativas claras en torno a este tema, pero emite algunas orientaciones para productos, consejos voluntarios a la industria a través del Inventario del Centro para la Seguridad Alimentaria, (Center for Food Safety Inventory). Asimismo, la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Pro-

⁶ La iniciativa NANOREG tuvo como objetivos: 1. Proveer a los legisladores de un *set* de herramientas para la evaluación del riesgo e instrumentos para la toma de decisiones en el corto y mediano plazo, reuniendo datos y evaluaciones piloto de riesgos, como monitoreo y control de exposición de un selecto número de nanomateriales utilizados en productos. 2. Desarrollar a largo plazo nuevas estrategias de testeo adaptadas al alto número de nanomateriales con impacto ambiental y sanitario. 3. Establecer una colaboración próxima entre las autoridades y la industria en relación con el conocimiento requerido para una apropiada evaluación del riesgo y crear las bases para enfoques comunes y mutuamente aceptables de prácticas de administración del riesgo. Fuentes: documentos publicados en el sitio nanoreg.eu. Gottardo (2017).

⁷ Fuente: European Commission (2008). *Commission Recommendation Of 07/02/2008 On A Code Of Conduct For Responsible Nanosciences And Nanotechnologies Research* (Com 424). <ftp://Www.Cordis.Europa.Eu/Pub/Fp7/Docs/Nanocode-recommendation.Pdf>

tection Agency-EPA) establece programas voluntarios para las empresas que manipulan nanomateriales, estas son invitadas a presentar información. Del mismo modo, otros programas voluntarios y códigos de conducta para investigaciones responsables en nanociencias y nanotecnologías,⁸ algunos de estos similares a los de la Comunidad Europea, para la sustentabilidad, la innovación y la excelencia.

No podemos dejar de mencionar la Conferencia Internacional para el Manejo de Químicos, donde se adoptó un marco de políticas para la manipulación de químicos y se propuso un enfoque estratégico: el *Strategic Approach International Chemical Management*, desarrollado por un comité preparatorio multiactoral y sectorial (gobiernos, organizaciones inter-gubernamentales, industria y organizaciones de la sociedad civil) que persigue el alcance de metas del Acuerdo de Desarrollo Sustentable de la Conferencia de Johannesburgo en 2002, para minimizar hacia el 2020 los impactos adversos significativos para el ambiente y la salud humana de los químicos. En dicho marco, en 2009, durante la Segunda Conferencia Internacional sobre la Gestión de Productos Químicos (ICCM2), se acordó la Resolución II/4 sobre nanotecnologías y nanomateriales manufacturados, que, entre otras cosas, invitaba a organizaciones internacionales pertinentes para entablar un diálogo con las partes interesadas con miras a lograr una mejor comprensión a este respecto (Berger, 2018).

Observando estos distintos escenarios, podemos identificar y analizar tendencias de juridificación, creación de normas y códigos regulatorios, abiertos, que se desarrollan para las nanotecnologías en un escenario global de coexistencia y/o colisión de distintos órdenes normativos, cada cual con su pretensión por establecer principios y marcos orientadores de políticas para la innovación y la regulación.

Volviendo desde los ejemplos al marco teórico, nos interesa destacar un conjunto de estudios sociolegales críticos y sistémicos, para profundizar en el estudio de estas complejas interacciones y transiciones entre estructuras de poder con conceptos como la multiplicidad de escenarios y órdenes normativos y desarrollos que visibilizan la diferenciación funcional y jurídica de estructuras estatales y transnacionales contemporáneas (Teubner, 2010 y 2012; Kjaer, 2010a y 2014). Walker propone entender como un aparente “desorden de órdenes normativos” (Walker, 2008) la superposición de estructuras institucionales, de reglas y de tomas de decisión que ya no se fijan por las formas y fronteras institucionales del derecho y la ley público-estatal/inter-estatal, sino que

⁸ En diciembre de 2004, el Consejo de Política Científica de la EPA formó una agencia transversal a modo de Grupo de Trabajo en Nanotecnología, que determina lineamientos sobre aplicaciones e implicaciones de la nanotecnología. En relación con la evaluación de riesgo, establece parámetros para la identificación y caracterización química y física de los nanomateriales, detección y análisis en medio de ambiente, posibles liberaciones y exposiciones humanas, evaluación de los efectos en la salud humana y de los efectos ecológicos (EPA, 2007). Fuente: Environmental Protection Agency (EPA) (2007). White Paper on Nanotechnology: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/nanotechnology_whitepaper.pdf (03/04/2020)

remiten a procesos privados, corporativos de generación de normas (Buethe y Mattli, 2011; Arato, 2015).

Aquí es donde observamos la importancia clave de un análisis desde la retícula de la *governance* para los fines de nuestro trabajo. Este concepto ha sido entendido como una modalidad de gestión de lo político, las políticas públicas y la gestión de los asuntos colectivos, en la forma de redes descentralizadas que mixturán lo público y lo privado, con modos flexibles y eficientes que las rígidas estructuras estatales no tienen. Por ello, la *governance* se caracteriza por su estructura multi-nivel, multi-actoral, multi-escalar: organizaciones internacionales, empresas multinacionales, organizaciones de la sociedad civil, estructuras administrativas nacionales y locales se superponen en un complejo entramado institucional y normativo, muchas veces superpuestas, en tensión, en colisión (Fischer Lescano y Teubner, 2004; Moller, 2016).

En este marco, atendiendo a su polisemia, proponemos un uso del concepto que destaca su función sistémica, inter-jerárquica e inter-contextual, consistente en fungir simultáneamente como zonas de freno y correas de transmisión entre estos órdenes normativos (Kjaer, 2010a: 156). Así, la matriz compleja de la *governance* sobrepasa la organización política territorialmente delimitada, desdibujando formas verticales tradicionales de configuración organizacional, control y sanción, lo cual conduce a una sistemática incertidumbre en relación a qué es lo colectivo en la toma de decisiones hacia donde se orientan las estructuras inter y transnacionales, en términos de Kjaer (2010b), generando un “híbrido dentro de un híbrido”. La concepción de *governance* en relación con un determinado escenario normativo no se basa exclusivamente en una acción de gobierno, sino en promover procesos de coordinación entre diferentes actores públicos y privados, en el modo más resiliente, flexible y participativo posible, en torno a una pluralidad de fuentes del derecho (Aldrovandi *et al.*, 2014: 78; Saldívar Tanaka, 2020).⁹

Rescapitulando, el concepto de *governance* remite, en nuestro uso, a una función de estabilización, compatibilización y modulación de una pluralidad de órdenes normativos para las nanotecnologías (inclusive y actualmente especificado en términos de una *governance* regulatoria).¹⁰ En otras palabras, nuestro

⁹ La teoría del diálogo entre las fuentes del derecho sustenta estas concepciones. El hecho jurídico puede ser construido con independencia del poder legislativo en el marco de una teoría no normativista de la decisión jurídica, abonando una explicación reflexiva de la decisión jurídica, con una teoría del conocimiento de corte constructivista (Engelmann, 2012: 320) y argumenta que el estudio de la legitimidad no necesariamente tiene que estar vinculado a una visión formalista del derecho sino abierta al pluralismo resultante de una globalización policéntrica, que da cuenta de marco legislativo de los estados, el orden internacional de los Derechos Humanos (DDHH), la autorregulación empresarial (Engelmann, 2012).

¹⁰ Aunque excede el objetivo de este trabajo, señalamos que el marco teórico se densifica con la noción de *governance* regulatoria (Levi Faur, 2011; Kjaer y Vetterlein, 2018). En dicho concepto se articulan diferentes enfoques y temas que enfocan la *governance* a través de la regulación, principalmente desde directivas en torno de las buenas prácticas regulatorias (OCDE/ KDI, 2017). La literatura señala que mientras la desregulación fue el término

marco de análisis se enfoca en la *governance* para caracterizar esta nueva modalidad de gestión y regulación de asuntos que impactan colectivamente, superando el marco estatal por estructuras intermediarias multi-actorales, multi-escalares. Asimismo, para enfocar en su función sistémica que opera para el mantenimiento de este (des)orden policéntrico, y modulando sus conflictos y colisiones, entre estos, respecto de la actualidad del ejercicio de derechos.

Con estos elementos, en el apartado siguiente realizamos un salto de escalas, buscando una comprensión acerca de cómo se estructuran las instituciones intermediarias de la *governance* para configurar los escenarios normativos de las nanotecnologías en Brasil y Argentina.

Escenarios normativos en Brasil y Argentina: de los incentivos a la nanotecnología a los (fallidos) intentos de generar legislación y regulación nanoespecíficas

Tal como adelantamos en nuestras hipótesis de trabajo, en Brasil y Argentina no existe una legislación nanoespecífica para asuntos de evaluación y prevención de riesgos, y es muy incipiente aún la normativa para la protección de derechos ante los impactos de las nanotecnologías frente a políticas proactivas para la promoción de la innovación nanotecnológica. Hemos agrupado la descripción de cada escenario en dos subapartados para dar cuenta, respectivamente, de incentivos a la innovación y de intentos de legislación/regulación nanoespecíficos.

Escenario Brasil

Incentivos a la innovación nanotecnológica

En Brasil, hacia el año 2000, el Ministerio de Ciencia y Tecnología comienza el financiamiento de la investigación en nanotecnología con el auspicio de apenas cuatro redes científicas, y en 2004 incorpora un programa específico para el desarrollo nanotecnológico en el Plan Plurianual de Ciencia y Tecnología, posteriormente ampliado con el lanzamiento del Programa Nacional de Nanotecnología. El financiamiento de las asociaciones universidad-empresa, la creación y actualización de laboratorios, calificación de recursos humanos y proyectos de incubadoras de empresas de base nanotecnológicas fueron las actividades iniciales. Hacia 2010, diez redes colaborativas ya contaban con financiamiento y otras veinte estaban siendo promovidas, llegaron a contar en la actualidad con más de cincuenta centros de investigación, mil doscientos investigadores y ciento cincuenta empresas que desarrollan o aplican nanotecnología (Dos Santos, 2013; Berger, 2018).

predominante en el debate regulatorio de las últimas tres décadas (Koop y Lodge, 2017), el momento actual tendría una discusión sobre nuevas demandas *re-regulatorias* a través de los referidos dispositivos. Esto se debería a la proliferación de marcos regulatorios y las políticas de armonización y estandarización promovidas especialmente por tratados, acuerdos y negociaciones de libre comercio (Schaffer, 2015).

El principal órgano decisorio en materia de políticas, directrices y medidas encaminadas al desarrollo de la nanotecnología en Brasil es el Comité Interministerial de Nanotecnología (CIN), formado por representantes de diez ministerios, siendo el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI) el responsable de su coordinación.¹¹ En 2014, el Comité aprobó la entrada de Brasil en el proyecto NANoREG de la Comunidad Europea, destinado a buscar respuestas científicas a las cuestiones reglamentarias relacionadas con la nanotecnología, en el que participan varios países europeos, además de otros como Japón, Corea del Sur, Australia y Canadá. En 2012 se creó también el Sistema Nacional de Laboratorios de Nanotecnología (SisNANO), con el objetivo de aumentar la interacción entre investigadores brasileños que realizan investigación básica y avanzada, para fortalecer un área estratégica para el desarrollo industrial y creación de empresas de base tecnológica. El SisNano integra el Programa Nacional de Nanotecnología, junto con las Redes Cooperativas de Investigación y Desarrollo en Nanotoxicología y las Redes de Nano-instrumentación (Berger, 2018). Otras iniciativas destacadas incluyen la creación de la Red de Nanotecnología Aplicada al Agronegocio (AgroNano)¹² creada dentro de la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA), agencia que históricamente ha llevado adelante convenios de experimentación con compañías privadas del sector biotecnológico.

Intentos de legislación/regulación nanoespecífica

En cuanto a las iniciativas legales para la gestión de los riesgos de nanopartículas, nanofibras, nanorresiduos, en Brasil ya se han propuesto cinco proyectos de ley en el Congreso. El primer proyecto, presentado en 2005, tenía por objeto aplicar la Política Nacional de Nanotecnología, crear la CTNano (Comisión Técnica Nacional de Seguridad en la Nanotecnología), además de establecer un Fondo de Desarrollo de la Nanotecnología y crear un marco general sobre “nanoseguridad”, este fue rechazado por distintas comisiones parlamentarias. El segundo proyecto de ley, presentado en 2007 y también rechazado, tenía por objeto hacer enmiendas específicas a normas básicas sobre los alimentos y la Ley de vigilancia sanitaria, a la que están sujetos los medicamentos, las drogas,

¹¹ La creación del Comité Interministerial de Nanotecnología (CIN) otorga un estatuto de jerarquía y una estructura de governance y ejecución que coordina a los distintos ministerios: Agricultura, Ganadería y Abastecimiento, Defensa, Desarrollo, Industria y Comercio Exterior, Trabajo, Educación, Medio Ambiente, Minería y Energía, Salud, coordinados por el Ministerio de Ciencia. El CIN tiene por finalidad asesorar a los ministerios en la integración de gestión, coordinación y elaboración de políticas, directrices y acciones para el desarrollo de las nanotecnologías en Brasil. Entre sus atribuciones, le corresponde al CIN proponer mecanismos de acompañamiento y evaluación de actividades en el área, formular recomendaciones de planes, programas, metas y acciones para consolidar la evolución de las nanotecnologías, indicando las potenciales fuentes de financiamiento y los recursos para apoyar proyectos de investigación, desarrollo e innovación. (Fuente: *Portaria interministerial* no 510, de 9 de julio de 2012).

¹² Fuente: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/38194/nanotecnologia-aplicada-ao-agronegocio>

los insumos farmacéuticos y productos afines, cosméticos y desinfectantes.¹³ En el texto del proyecto de ley se preveían modificaciones para determinar que las etiquetas y los materiales publicitarios relativos a los productos, las drogas, los insumos farmacéuticos y productos conexos, los cosméticos, los desinfectantes, preparados mediante la nanotecnología, aportaran la información para la protección al consumidor. El proyecto fue presentado a la Comisión de Asuntos Sociales y a la Comisión de Medio Ambiente, Protección al Consumidor y Control e Inspección de la Cámara de Diputados, que no obstante expresaron su rechazo, entendiéndolo como una propuesta de intervención jurídica innecesaria, ya que tal requisito no debe ser incluido en una ley ordinaria, pues la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria (Anvisa) tenía competencia para regular la materia, mediante una norma infralegal. Igualmente, los requisitos de información estarían desprovistos de base científica, además de poder causar confusión innecesaria y alarmas al consumidor, y daños económicos a las empresas (Engelmann *et al.*, 2013).

El tercer y cuarto proyecto, de 2013, referían, respectivamente, a una nueva iniciativa para establecer el etiquetado y, por otro lado, a la creación de una política nacional de nanotecnología para el incentivo a la investigación y al desarrollo tecnológico.¹⁴ Cabe destacar que el proyecto establecía un control por parte del Poder Público de los riesgos e impactos derivados de las actividades de nanotecnología, observando los principios de información, transparencia, participación social, precaución, prevención y responsabilidad social, estableciendo la creación de planes de vigilancia específicos para los procesos y productos de la nanotecnología, cuando las autoridades públicas entienden que estos pueden causar daños al medio ambiente o a la salud humana o animal. También, el proyecto establecía relaciones de interlegalidad con otras disposiciones legales tales como la Política Nacional de Residuos Sólidos y la Política Nacional de Protección Civil y Defensa.

Por último, en febrero de 2019 se firmó un protocolo en la Cámara de Diputados de Brasil (Ley Proyecto de Ley 880/2019), que estableció el Marco Jurídico de la Nanotecnología y los Materiales Avanzados; en él se prevén incentivos para el desarrollo científico, la investigación, la capacitación científica y tecnológica y la innovación en nanotecnología, aprobados por la Comi-

¹³ Fuentes: PL No. 131, de 2010, que tenía por objeto hacer enmiendas específicas al Decreto Ley No. 986, de 21 de octubre de 1969, que establece normas básicas sobre los alimentos, y la Ley No. 6.360, de 23 de septiembre de 1976.

¹⁴ La aplicación de la Política Nacional de Nanotecnología se basaría en cuatro instrumentos (art. 3): a) el registro nacional para el control y la vigilancia de los proyectos de investigación, desarrollo tecnológico, generación, comercialización e inserción en el mercado de los nanoproductos; b) la autorización de las Autoridades Públicas en materia de salud humana, animal y ambiental para la investigación, producción y comercialización de nanoproductos o derivados de procesos nanotecnológicos; c) la exigencia de estudios de impacto ambiental para la liberación de nanoproductos en el medio ambiente; d) la promoción de estudios e investigaciones sobre los efectos de los nanoproductos en la salud humana y animal, y en el medio ambiente (Berger, 2018: 158).

sión de Constitución y Justicia (CCJ) del Senado Federal, en enero de 2020. Cabe señalar que este proyecto no solo se orienta hacia la mayor seguridad jurídica a la investigación y la fabricación con nanotecnología y materiales avanzados o nuevos materiales en el país, sino que atiende aspectos de sustentabilidad y participación, y pautas específicas para una política nacional de nanoseguridad.¹⁵ De esta manera, las repercusiones podrían tener impacto en la Ley de Innovación Tecnológica (Ley 10.973, de 2004) en la medida en que el estímulo al espíritu empresarial y el fortalecimiento del ecosistema de innovación del Brasil deben estar en consonancia con los principios ambientales, éticos, de salud y de seguridad.

Cabe destacar sobre este último proyecto, la incidencia del Ministerio Público del Trabajo, que aportó directrices para garantizar la reducción de los riesgos para la salud, la higiene y la seguridad, entre ellas: la protección de la salud del público, los consumidores y los trabajadores, la aplicación de medidas específicas para la salud laboral, la evaluación y el control de los posibles efectos en la salud de los trabajadores, la capacitación, la educación y la calificación profesional de los trabajadores, de manera permanente, la información adecuada y contextualizada.

Escenario Argentina

Incentivos a la innovación nanotecnológica

A partir de 2003, las nanotecnologías son consideradas como un área prioritaria de financiamiento por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Nación, en un contexto de apoyo a las emergentes tecnologías de propósito general en el país (Hurtado *et al.*, 2017). La referencia central la constituye la trayectoria de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN),¹⁶ creada en 2005 por decreto presidencial como persona de derecho privado, primeramente dentro del Ministerio de Economía, luego en el Ministerio de Ciencia y Técnica (MinCyT), con el objetivo de fomentar la generación de valor agregado de la producción nacional, para el consumo del mercado interno, y para la inserción de la industria en los mercados internacionales. Los mentores de la FAN conciben el desarrollo de la nanotecnología en función de la actualización y crecimiento de la matriz productiva argentina, al servicio de las necesidades fundamentales del país, y aceptando el desafío de competir en el

¹⁵ Según la justificación del Proyecto de Ley 880/2019, del que es autor el Senador Jorginho Mello: La clave para evaluar el cumplimiento de la seguridad de la nanotecnología es evaluar la cadena de valor, en lugar de una sola evaluación de los nanomateriales o los nanoproductos por sí solos. El sistema propone la implementación del paradigma *Safe by Design*, que evidencia la seguridad ocupacional y ambiental durante todo el ciclo de uso, manejo, manipulación y producción de nanomateriales para la investigación académica y el desarrollo de productos de la industria, alineados con los agentes de desarrollo y las agencias reguladoras/fiscales, armonizados con la legislación global dirigida por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y cumpliendo con los desafíos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDS) (Berger, 2018).

¹⁶ Fuente: Sitio de la Fundación Argentina de Nanotecnología (FAN): <http://www.fan.org.ar/>

mercado global a partir de las ventajas comparativas para ofrecer productos de alta tecnología.¹⁷ Desde este marco, la FAN ha desarrollado diversas actividades orientadas al fortalecimiento de iniciativas de investigación y su aplicación-vinculación empresarial: Programa Incubación de Empresas (Etapa “Pre Semilla”), Programa “Encuentros Nanotecnología para la Industria y la Sociedad”, Concurso “Nanotecnólogos por un día”, Encuentro Bienal “Nanomercurus”, NanoPymes, entre otros.¹⁸

La FAN promueve también la articulación de redes de investigación financiadas por fondos públicos, en universidades y centros de investigación estatales. Enmarcado en los objetivos del plan Argentina Innovadora 2020/2030, la nanotecnología (junto con la biotecnología) fueron definidas como líneas prioritarias de financiamiento del Mincyt, con transferencia tecnológica al mercado, para aumentar la competitividad industrial y agregar valor a la producción nacional.¹⁹ Dicho plan introduce el marco teórico-analítico de los Sistemas Nacionales de Innovación, cuyos rasgos distintivos son la financiación de grupos de I+D y la tendencia a incrementar conexiones con el sector empresarial a fin de actualizar y fortalecer las capacidades industriales nacionales (Vila Seoane, 2014), especialmente mediante la promoción de la asociatividad público-privada.²⁰

Intentos de legislación/regulación nanoespecífica

A nivel de iniciativas legislativas en el sector, señalamos una serie de intentos fallidos. El Proyecto de Ley Marco para el Plan Nacional estratégico de desarrollo de micro y nanotecnologías no llegó siquiera a tener una instancia de audiencia pública. El proyecto de ley establecía requisitos mínimos que orientan la definición de la política en el área y establecía instrumentos crediticios y de beneficios fiscales para la industria nanotecnológica.²¹

¹⁷ Fuente: Registros de sesiones plenarias, Nanomercurus 2015.

¹⁸ <http://www.fan.org.ar/acciones> . Entrevista a funcionario de la FAN (2017).

¹⁹ Cabe señalar, por otro lado, que en la edición 2015 de la serie de eventos Nanomercurus, que convocan a científicos, nanotecnólogos y empresas del sector, se discutieron las barreras de ingreso a los mercados y las posibilidades de las nano en los procesos productivos, proponiendo avanzar en vinculaciones estratégicas para posibilidades de inversión con eje en el aprovechamiento de recursos y capacidades técnicas, las buenas prácticas y certificaciones de calidad, para el desarrollo de nuevas cadenas de valor. Fuente: registro de participación en sesiones plenarias.

²⁰ Aunque no abordaremos en profundidad, se destacan, en esta línea, el Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), para proyectos de alta tecnología. Fuente: Entrevista a funcionaria del FONARSEC (2015). Para más información: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/publicaciones/informes/casos-de-asociatividad-e-innovacion-nanotecnologia>

²¹ El proyecto incluía entre sus puntos: identificar el tipo de micro y nanotecnologías que desde un punto de vista estratégico será más conveniente introducir y desarrollar en el mercado, de acuerdo con las ventajas competitivas que potencialmente pueda disponer nuestro país durante las próximas décadas; identificar los grupos de investigación y desarrollo que muestren capacidad para desarrollar investigaciones aplicadas al desarrollo de productos de micro y nanotecnologías; identificar aquellos grupos de investigación y desarrollo con capacidad de transferir al sistema productivo nacional innovaciones y productos de micro y

Bailo (2018) analiza distintas iniciativas legislativas en el país, en la línea de promover financiamiento para el desarrollo de ventajas competitivas de empresas locales,²² ninguna de las cuales llegó a debatirse, también dentro de la línea de la promoción e incentivos económicos.

En la actualidad, mientras tanto, la denominada Ley de Economía del Conocimiento crea el Régimen de Promoción de la Economía del Conocimiento, con el objetivo de promocionar actividades económicas que apliquen el uso del conocimiento y la digitalización de la información apoyado en los avances de la ciencia y de las tecnologías, a la obtención de bienes, prestación de servicios y/o mejoras de procesos, con los alcances y limitaciones establecidos en la presente ley y las normas reglamentarias que en su consecuencia se dicten. Dentro de las actividades promovidas, se encuentran la nanociencia y la nanotecnología, como la biotecnología, la bioinformática, biología molecular, neurotecnología e ingeniería genética, entre otras.²³

En el año 2020, la ley fue modificada con base en la principal objeción, que dicho marco de incentivos beneficiaría especialmente a grandes empresas, y no a pequeñas y medianas (Pymes). También se señaló como problemático que la redacción del marco normativo no permitía clasificar con claridad actividades como la nanotecnología, entre otras. Sin embargo, al día de la fecha, la propuesta de modificación en curso tampoco incluiría referencias a la evaluación de riesgos, o consideraciones de impactos ambientales, sanitarios y sociales en general.

De esta manera, y ante la falta de un marco legal nanoespecífico en Argentina, cabe señalar la producción de normas infralegales, que establecen pautas o criterios para la regulación de las nanotecnologías, no solo en la incipiente industria local sino también frente a la importación de productos y de incorporación de procesos productivos con nanotecnología en el país. Así, distintos ámbitos de la administración pública empezaron a formular algunas iniciativas en regulación y vigilancia.

nanotecnologías que puedan comercializarse en el mercado nacional e internacional; diseñar estrategias para la promoción de incubación de nuevas empresas de capital nacional, con la capacidad de producir y comercializar micro y nanotecnologías desarrolladas en nuestro país; diseñar y proponer alianzas estratégicas con empresas nacionales e internacionales para el desarrollo, patentamiento, transferencia y comercialización de productos de micro y nanotecnologías; diseñar y proponer estrategias para la promoción crediticia e impositiva que estimulen el establecimiento de empresas de origen nacional que desarrollen, fabriquen y comercialicen micro y nanotecnologías; crear mecanismos que apoyen y estimulen el patentamiento nacional e internacional de productos de micro y nanotecnologías desarrollados en el país. Fuente legislativa: <http://www1.hcdn.gov.ar/dependencias/ccytecnologia/proy/3.279-D-05.htm>

²² En 2006, se presentó un proyecto de ley marco de la industria nanotecnológica, que incluía algunas definiciones técnicas sobre nanoproducto o nanocomponente. En 2008, un nuevo proyecto proponía un marco legal común para las nanotecnologías, la física cuántica y la biología sintética, y preveía la creación de un Instituto Nacional de Nanotecnología, Física Cuántica y Biología Sintética (INFIBI), como un ente autárquico dentro del ámbito del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación (Bailo, 2018).

²³ Fuente legislativa: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-27506-324101>

En en al ámbito del Ministerio de Salud, ya desde 2007, constan algunas iniciativas en formato de buenas prácticas, tal es el caso de resoluciones sobre investigación clínica en seres humanos, que menciona las nanotecnologías aplicadas a la medicina genómica-proteómica y medicina regenerativa. Hacia el año 2012, la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT), conformó un grupo de trabajo multidisciplinario, con el objeto de abordar y analizar aspectos vinculados con la aplicación de la nanotecnología en los productos para la salud cuyos dossier aprobaba el organismo. Actualmente, una disposición del organismo ha introducido definiciones sobre nano-objetos en medicamentos.²⁴

Por su parte, la Superintendencia de Riesgos de Trabajo (SRT) creó el Programa Nacional de Prevención por Rama de Actividad (Resolución 770/2013) con el objetivo de desarrollar y programar políticas activas de prevención primaria, secundaria y terciaria, de manera conjunta o independiente con las organizaciones empresariales, las organizaciones sindicales, las administradoras de trabajo locales y las aseguradoras de riesgo de trabajo, incluyendo una referencia explícita a la nanotecnología. Una iniciativa que acompañó estas medidas fue la creación del observatorio sobre nanotecnología y salud de los trabajadores en el ámbito de la Secretaría de Riesgos del Trabajo, con el objetivo de lograr la articulación entre los diferentes actores que participan en el desarrollo de la nanociencia y nanotecnología, con la tarea de relevar y difundir información sobre las investigaciones vinculadas con la fabricación y manipulación de nanomateriales. También se encargaría de promover medidas de nanoseguridad para laboratorios de nanociencia, en los procesos productivo, de almacenamiento y transporte de nanomateriales, así como de métodos de evaluación de riesgo químico para nanomateriales.²⁵

Por último, cabe mencionar también a una institución público-privada de referencia, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), la filial argentina de las ya referidas ISO. El IRAM cuenta con un comité de nanotecnologías integrado por especialistas en nanociencias y nanotecnologías de los sectores académicos (universidades, centros de investigación), empresariales y del sector público (SRT, ANMAT, Ministerio de Salud). El comité tiene como función principal establecer políticas y líneas de acción para el desarrollo de la normalización en el área de las nanotecnologías, y se ha abocado principalmente a la traducción y discusión de las normas ISO en normas IRAM para circulación local/ nacional.²⁶ Las normas ya traducidas y aprobadas son en: vocabulario, hoja de datos de seguridad; metodología para la evaluación del riesgo de nanomateriales y gestión del riesgo ocupacional aplicado a nanomateriales de ingeniería y principios del control *banding*.²⁷

²⁴ Fuente: entrevista a funcionario de ANMAT (2019).

²⁵ Fuente: entrevista con funcionario del SRT (2019).

²⁶ Fuente: Boletín del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), 2(2), 12-13.

²⁷ Fuente: entrevista con funcionaria del IRAM (2018) y registro de participación en reunión comité Nano del IRAM (2019).

Escenarios normativos en Brasil y Argentina, algunas comparaciones

Tras haber repasado panorámicamente los escenarios normativos en Brasil y Argentina, podemos realizar algunas comparaciones entre ambos. En primer lugar, la estructura inter-institucional de alta jerarquía para supervisar el desarrollo de las nanotecnologías en Brasil, frente a una inexistente estructura de este tipo en Argentina, proyecta distintas posibilidades de políticas para conformar un sistema, tal como fue descrito en un país y en otro.

En segundo lugar, en términos de *governance*, el entramado inter-actoral (quiénes participan o han llegado a participar en algún momento) y el marco de la discusión pública sobre impactos de las nanotecnologías tienen vías institucionalizadas a nivel del poder ejecutivo o en los proyectos legislativos, más allá de que estos no hayan prosperado en Brasil, tras la pretensión de establecer un marco de políticas nacionales, no así en Argentina. Brasil, en cambio, ha logrado un pequeño avance en la discusión del marco legal para el desarrollo nanotecnológico, con las referidas directrices de la Fiscalía del Trabajo y organizaciones académicas y de la sociedad civil para establecer principios de precaución y sostenibilidad ambiental, evaluación de impactos; responsabilidad del productor, participación e información al público, entre otros aspectos que implican inclusive la ley marco de innovación tecnológica. Por otra parte, la Ley de Economía del Conocimiento en Argentina no hace ninguna referencia en relación con estos aspectos. Por ello, los planes, medidas y reglamentos estatales relativos al desarrollo tecnológico no han incorporado aún de manera programática los aspectos reglamentarios y regulatorios de la nanotecnologías, en áreas como certificación de productos o programas de nanoseguridad para la gestión de riesgos. En Argentina, por lo tanto, proliferan diversos organismos y normas infralegales.

En tercer lugar, para ambos casos constatamos la preeminencia de las políticas de incentivo a la innovación nanotecnológica, por sobre la discusión de un marco normativo que contemple los diversos aspectos (políticas de evaluación del riesgo, nanoseguridad, nanotoxicología, participación, etc). Disponer o no disponer de un marco legal nanoespecífico en estos términos no garantiza una efectiva democratización ni protección de derechos, pero sí habilita una participación institucionalizada de todos los actores intervinientes, mediante acciones de invocación por parte de la ciudadanía, debate público legislativo o sanción judicial, superando el discurso de la innovación, más restricto aún a una perspectiva productivista y de la competitividad, y sin contrapesos argumentativos, como los que se esgrimen desde el principio precautorio.

Finalmente, los proyectos de legislación, mismo que fallidos, son casi desconocidos para la mayoría de la población e incluso para los científicos, empresarios y otros agentes que participan en el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología. Como hemos señalado, las iniciativas parlamentarias de propuestas legislativas relativas a la formación de una Política Nacional de Nanoseguridad y el deber de etiquetar los productos que hacen uso de la nanotecnología, han tenido además poco o nulo apoyo parlamentario. En Brasil,

aún más, tales iniciativas fueron criticados por presentar fallas técnicas a nivel científico y legal, pero no avanzaron principalmente porque las iniciativas fueron criticadas como riesgo para el desarrollo científico y tecnológico del país, ya que podrían representar más burocracia y costos para todos los involucrados en la ciencia, el desarrollo tecnológico, la innovación y el comercio. Por ello, nuestro análisis identifica como deficitaria en ambos países la promoción del acceso a la información sobre nanotecnología y la participación democrática en la toma de decisiones en la ejecución de las políticas públicas pertinentes. De esta observación, se desprende nuestro siguiente y último punto, que interroga sobre la actualidad del ejercicio de derechos en relación con impactos de las nanotecnologías.

¿Nano-públicos, nano-ciudadanía?

Hemos descrito y analizado hasta aquí, los escenarios normativos en una escala transnacional y en escalas nacionales de Brasil y Argentina, dando cuenta de su complejidad institucional, caracterizada por el aumento cuantitativo de relaciones entre los subsistemas del derecho, la administración pública, el mercado, la ciencia. Las estructuras intermediarias de la *governance* parecieran avanzar sobre el sentido de conceptos como esfera pública, ciudadanía y representación política. Y al hacerlo, generan algunos desplazamientos semánticos en relación con estructuras democráticas de toma de decisión, por los de grupos de interés o partes interesadas (*stakeholders* en términos de la *governance*), un conjunto institucionalizado de actores que integran los comités de expertos, con relativa participación de las “partes” directamente afectadas, como pueden ser ciudadanos, consumidores y trabajadores.

En este sentido, y como establecimos en nuestra hipótesis de trabajo, las distorsiones y la sustitución de los mecanismos democrático-representativos que se producen por la expansión de la *governance* tienen como efecto no solo en jaque la forma estatal de ley, sino que ponen al ejercicio ciudadano frente a una serie de obstáculos para la participación y la protección de derechos.

Gerhke (2018) utilizó la noción de nano-públicos para referirse principalmente a un grupo de usuarios de las nanotecnologías. Al amparo de las políticas de comunicación pública de la ciencia, este concepto apuntaría a la conformación de una base para la aceptación social de las nanotecnologías, a través de asociaciones o ¿ecologías?, usando el concepto del autor, para un involucramiento público “más orgánico”, realmente existente, por contraposición a públicos idealizados desde perspectivas teóricas sobre la deliberación. Por otro lado, Bensaude-Vincent (2012) apunta críticamente a la comunicación pública como forma de alfabetización tecnológica de los usuarios, y propone alternativamente la conformación de estructuras de justificación democráticas de las decisiones sobre el desarrollo nanotecnológico. Entendiendo que la ciudadanía tiene derecho a asegurar que las elecciones tecnocientíficas respeten sus valores sociales y morales, la autora apela a la ampliación de la evaluación pública, no solo de expertos, acerca de los impactos sociales, am-

bientales, éticos, inclusive desde las fases iniciales, en el nivel de investigación básica y mucho antes de que las aplicaciones entren en el mercado (Bensaude-Vincent, 2012). En este sentido Wickson *et al.*, (2010) también enfatizan que en un contexto heterogéneo de los públicos de la nanotecnología, el encuadre de los mismos en términos de ciudadanía permite superar categorías más encorsetadas de expertos, consumidores o *stakeholders*, hacia la consideración de actores que se autodefinen de forma dinámica como miembros de una comunidad (política), que ejercen derechos y obligaciones en la deliberación y definición de asuntos de ciencia y tecnología.

Al respecto, en el escenario normativo global se destaca una iniciativa articulada por organizaciones como el International Center for Technology Assessment (Centro Internacional para la Evaluación de Tecnología) y Amigos de la Tierra Internacional, que ya en el año 2007 organizaron un encuentro con diversas organizaciones de la sociedad civil para debatir y formular principios fundamentales para la evaluación y supervisión de las nanotecnologías. El proyecto que dio en llamarse NanoAction (2007) formuló un documento de libre acceso afirmando una política de precaución y reclamando la adopción de políticas y mecanismos nanoespecíficos para la protección de la salud pública, con énfasis en medidas que salvaguarden el medio ambiente y protocolos críticos para la evaluación del riesgo. La promoción de la discusión pública sobre los impactos de la nanotecnología, siguiendo el documento de NanoAction, debe incluir también la consideración de amplios y extendidos impactos, hasta la responsabilidad del productor por los residuos de los productos con nanotecnologías.

A escala de los países cuyos casos hemos presentado aquí, destacamos en este sentido la creación de la Red Nanotecnología, Sociedad y Ambiente (RENANOSOMA), en Brasil, en 2003, a partir de un encuentro de redes del Foro Social Mundial, en particular los trabajos del ETC GROUP, que permitió enmarcar el estudio crítico de las nanotecnologías, y desde entonces alentar una serie de encuentros, seminarios, talleres, programas de TV y otros materiales de difusión. Esta red de prácticas al promover el debate público instalan otros marcos conceptuales que desafían aquella linealidad del discurso de la innovación y la competitividad (Martins, 2014).

Además de su importante producción de información en más de quince años de funcionamiento, la interacción de esta red con actores sindicales en Brasil ha sido clave para actualizar la lucha de los trabajadores por condiciones de salud laboral. Tal el caso de la Central Única de Trabajadores (CUT) y la Unión General de Trabajadores, entidades sindicales que, con la cooperación del Departamento Intersindical de Estadística y Estudios Socioeconómicos, publicaron un material de posicionamiento sobre los impactos éticos, sociales y ambientales de la introducción de nanotecnologías en los alimentos, productos y procesos productivos, reflejando no solo las preocupaciones con respecto a la salud de los trabajadores y trabajadoras sino también sus condiciones laborales, transformaciones económicas más amplias y

herramientas para la capacitación en estos temas. Fue en la Confederación Nacional del ramo químico de la CUT (CNQ/ CUT), donde en 2007 se discutieron estas preocupaciones, exigiendo una reglamentación específica en torno a los patrones y estándares de exposición, estudios ecotoxicológicos, llegando a lograr la primera negociación con la industria farmacéutica (IIEP, 2015). En el 2009, un grupo de trabajo —formado por la patronal SINDUS-FARMA, sindicato de la industria farmacéutica en el estado de Sao Paulo, y la Federación de Trabajadores del ramo químico de la Federação dos Trabalhadores do Ramo Químico de la CUT del Estado de Sao Paulo (FETQUIM) su fuerza sindical (FEQUIMFAR), como asociaciones de trabajadores de dicha industria— introdujo la discusión sobre nanotecnología a través de actividades de formación.²⁸ Producto de la movilización y formación de trabajadores y sus asociaciones, en 2012 se incorpora explícitamente un término al convenio colectivo de trabajo por el cual las empresas garantizan a los miembros de la comisión interna de prevención de accidentes y salud del trabajo que sean informados cuando se utilice nanotecnología en el proceso industrial. A partir de ese momento la discusión sindical se amplía a otras ramas de la industria para su homologación (IIEP, 2015: 68-69).

En síntesis, redes de activistas, expertos y académicos resultan claves para la tematización, la formación y también para generar una plataforma de intercambios y articulaciones, como lo presenta el caso brasileiro. Mientras que en Argentina, el ámbito de la tematización pública es prácticamente inexistente, y las pocas iniciativas que hubieron, tales como los observatorios de riesgo de trabajo (SRT) y de la ANMAT, que mencionamos en el apartado anterior, fueron desactivadas. Por otra parte, la referida negociación colectiva entre sindicatos e industria farmacéutica en Brasil podría analizarse como un ejemplo de *governance* también, por haber recurrido a otras fuentes del derecho en lugar de invocar un marco legal inexistente, que habría demorado o impedido tal vez establecer la cláusula informativa en el convenio de trabajo. En el caso argentino no tenemos registros de una experiencia similar, aunque hemos identificado, en el curso actual de nuestra investigación, la probable exigibilidad de normas IRAM/ISO por parte de la SuperIntendencia de Riesgos del Trabajo, en la fiscalización de empresas que declaren la utilización de nanomateriales en sus procesos productivos, lo cual generaría un problema de interlegalidad, por ejemplo en términos de qué tipo de sanciones se aplicarían, ya que se trata de normas privadas y voluntarias exigidas por un ente fiscalizador del Estado.

²⁸ A este respecto se destaca el papel de la Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO), organismo de investigación y capacitación sobre seguridad e higiene del trabajo del Ministerio de Trabajo de Brasil, actualmente transferido al Ministerio de Economía, a través de su Grupo de Investigación en Nanotecnología (Arcuri *et al.*, 2009).

Consideraciones finales

En la periferia de los debates internacionales sobre las orientaciones de la reglamentación de la nanotecnología como los presentados en este artículo, las instituciones vinculadas con la promoción de la ciencia, la tecnología y la innovación en Brasil y Argentina no han prestado la debida atención a las políticas de análisis del riesgo nanotecnológico, estén estas orientadas por la predominancia de la regulación basada en la evidencia científica, o por enfoques de la complejidad, como el promovido desde el principio precautorio. El incipiente campo de la nanotoxicología en estos países, releva y revela los efectos adversos de algunos productos, pero con un nivel de desarrollo que no se compara con el del incentivo a la innovación nanotecnológica.

La función sistémica de la *governance*, tal como hemos presentado en nuestro análisis, pareciera lograr la estabilización y compatibilización de escenarios normativos del derecho de competencia, corporativo-empresarial, con una regulación mínima que no constituya obstáculos a la innovación para el desarrollo industrial. Al mismo tiempo, modula los conflictos y colisiones con órdenes normativos que esgrimen la prioridad de la protección de derechos, propiciada por la tutela que establece el principio precautorio.

En este sentido, la *governance* avanza sobre la estructura democrática de toma de decisiones, con dispositivos que diluyen la participación ciudadana activa a un lugar de espectadores del progreso tecnológico, tales como la comitología, o las normas técnicas y regulaciones blandas en las que intervienen casi exclusivamente el saber experto— y con una limitada interdisciplina. En los casos estudiados observamos el secuestro de la discusión pública institucionalizada, y apenas algunas excepciones que son producto de luchas de trabajadores en procesos productivos particulares o formulación de proyectos legislativos, ambos en Brasil.

Frente a la incertidumbre de los efectos de los desarrollos nanotecnológicos, la predominancia de expertos en la deliberación y toma de decisiones, el principio precautorio aporta no solo en aspectos epistémicos hacia una ciencia de la complejidad, sino también en aspectos práctico-políticos que hacen a la democratización de los escenarios normativos aquí estudiados.

El principio precautorio puede informar una serie de prácticas sistémicas, que alertaran sobre el reforzamiento de controles ambientales y sanitarios, el establecimiento de normativas para el etiquetado y de otras regulaciones acordes con la protección de la salud de los trabajadores y de los consumidores. Al hacerlo, amplificaría también la visibilidad e inclusividad de actores actualmente no incorporados en el tratamiento de estas cuestiones en un marco de razonamiento público (Jasanoff, 2011), como una plataforma de epistemologías cívicas en la que se debatan argumentos y justificaciones de forma democrática en relación con asuntos nanocientíficos y nanotecnológicos (y, por extensión, a todas las tecnologías emergentes y convergentes).

Las estructuras de una *nanogovernance* democrática o democratizada podrían ofrecer tal inclusividad, no obstante, el señalado déficit democrático de las mismas no se reduce a la participación, sino que reclama un marco de plena vigencia de derechos y garantías de los miembros de una comunidad política. Una promesa que solo la forma del Estado-nación mantiene y que las luchas por derechos invocan.

Referencias

- Aldrovandi, A., Berger Filho, A. G., Von Hohendorff, R. y Engelmann, W. (2014). Nanotecnologías aplicadas aos alimentos: construindo modelos jurídicos fundados no princípio de precaução. En Magno Da Silva, Tania, Waissmann, William, *Nanotecnologias. Alimentação E Biocombustíveis. Um Olhar Transdisciplinar*. Aracaju: Editora Criacao.
- Aguilar Villanueva, L. (2007). El aporte de la política pública y de la nueva gestión pública a la gobernanza. *Revista del CLAD Reforma y Democracia*, 39, oct. Caracas.
- Arato, J. (2015). Corporations as lawmakers. *Harvard International Law Journal*, 56(2), 229-295.
- Arcuri, A., Pinto A. Martins, P., Maia, P. (2009). Developing strategies in Brazil to manage the emerging nanotechnology and its associated risks. En Linkov y Steevens (eds.), *Nanomaterials: risks and benefits*. Heidelberg: Springer Netherlands.
- Bailo, G. L. (2018). La regulación de las nanotecnologías en Argentina. *Revista de la Facultad de Derecho*, (45), e20184501. <https://doi.org/10.22187/rfd2018n45a1>
- Bensaude-Vincent, B. (2012). Nanotechnology: a new regime for the public in science? In *Scientiæ Zudia*, 10: 85-94. Special Issue. São Paulo.
- Berger, A.G (2018). *Regulação e governança dos riscos das nanotecnologias*, 1a ed. Belo Horizonte: Arraes Editora.
- Berwig, J. A.; Engelmann, W. (2019). O direito e os Direitos Humanos frente à nanotecnologia na sociedade complexa de risco e global. *Novos Estudos Jurídicos*, 24: 589-615 2019 (en línea).
- Bianculli, A., Jordana, J., Fernández-i-Marín, Xavier (eds.). (2015). *Accountability and regulatory governance. Audiences, controls and responsibilities in the politics of regulation*. Londres: Palgrave MacMillan.
- Blome, K. Franzki, H., Fischer-Lescano, A. Markard, N. y Oeter, S. (eds.). (2016). *Contested collisions: Interdisciplinary inquiries into norm fragmentation in world society*. Cambridge: Cambridge University Press, 198-225.
- Bosso, C. (ed.) (2010). *Governing uncertainty environmental regulation in the age of nanotechnology*. Washington-London: RFF Press.
- Buethel, T., & Mattli, W. (2011). *New global rulers: The privatization of regulation in the world economy*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Burgos Silva, G. (2009). “La conceptualización de la gobernanza”, En Burgos Silva, *Estado de derecho y globalización. El Banco Mundial y las reformas institucionales en América Latina*. Bogotá: CLACSO-ILSA-Universidad Nacional de Colombia.

- Cao, H.; Rey, M. y Laguado Duca, A. (2016): Ajuste estructural y sociocentrismo: el discurso de la gobernanza. En *Revista Administración Pública y Sociedad*, 1: 6-20, junio.
- Delgado Ramos, G. C. (2013). Ethical, social, environmental and legal aspects of nanotechnologies: a reading from Mexico. *International Journal of Innovation and Technology Management*. 10(2). World Scientific Publishing Co. 2013. Pp. 1340001-1/23. <https://doi.org/10.1142/S0219877013400014>
- Delgado Ramos, G. C. (2014). Nanotechnology in Mexico: global trends and national implication for policy and regulatory issues. *Technology in Society*. 37: 4-15, mayo. Elsevier.
- Delmas-Marty, M. (2004). *Por um direito comum*. São Paulo: Martins Fontes.
- Dos Santos, J. L. (2013). *Ciencia Do Futuro E Futuro Da Ciencia. Redes E Politicas De Nanociencia E Nanotecnologia No Brasil*. Rio De Janeiro: Ed Uerj.
- Duso, G. (2019). Conceptos políticos y realidad en la época moderna. *Hist. graf* (en línea). 2015, 44: 17-46 (citado 2020-10-23).
- Engelmann, W. (2012). O Dialogo Entre as Fontes do Direito e a Gestao do Risco Empresarial Gerado Pelas Nanotecnologias: Construindo as Bases a Juridicizacao do Risco. En Streck, Lenio, Severo Rocha L. Engelmann W. (Orgs.) *Constituicao, Sistemas Sociais E Hermenêutica. Anuario Do Ppg Em Direito Da Unisinos 9*. Sao Leopoldo: Livraria Do Advogado Editora.
- Engelmann, W. y Santos Martins, P. (2017). A iso, suas normas e estruturação: possíveis interfaces regulatórias. En Engelmann e Santos Martins. *As normas ISO e as nanotecnologias. Entre a autoregulacao e o pluralismo juridico*. Sao Leopoldo: Karywa.
- Engelmann, W., Aldrovandi, A.; Berger Filho, A. G. (2013). Perspectivas para a regulação das nanotecnologias aplicadas a alimentos e biocombustíveis. *Vigilância Sanitária em Debate. Sociedade, Ciência & Tecnologia*, 1: 115-127.
- Fischer-Lescano, A., & Teubner, G. (2004). Regime-collisions: 'The vain search for legal unity in the fragmentation of global law'. *Michigan Journal of International Law*, 25(4): 999-1046.
- Foladori, G., Invernizzi, et al. (coords.) (2012). *Perspectivas sobre del desarrollo de las nanotecnologías en América Latina*. Ciudad de México: Miguel Ángel Porrúa.
- Foladori, G., Invernizzi, (2015). *Nanotecnologias en América Latina. Trabajo y regulación*. Ciudad de México: Miguel Angel Porrúa.
- Fonseca, P. e Santos Pereira, T. (2014). The governance of nanotechnology in the brazilian context: entangling approaches. *Technology in Society* 37: 16-27, 2014.
- Gehrke, P. (2018). *Nano-publics. Communicating nanotechnology applications, risks, and regulations*. Cham, Suiza: Palgrave Pivot.
- Gottardo et al. (2017). NANoREG framework for the safety assessment of nanomaterials. Stefania Gottardo, Hugues Crutzen, Paula Jantunen (eds.). EUR 28550 EN. <https://doi.org/10.2760/245972>
- Gould, K. (2015). Slowing the nanotechnology treadmill: impact science versus production science for sustainable technological development. *Environmental Sociology*, 1 (3): 143-151, <https://doi.org/10.1080/23251042.2015.1041211>

- Hull, M. y Bowman, D. (2014). *Nanotechnology environmental health and safety risks, regulation, and management*, 2a ed. Oxford: Elsevier.
- Hurtado, D., Lugones, M. y Surtayeva, S. (2017). Tecnologías de propósito general y políticas tecnológicas en la semiperiferia: el caso de la nanotecnología en la Argentina. *Revista Iberoamericana de CTS*, 12(34): 65-93.
- IIEP (2015). *Guía de Nanotecnologías para Trabajadores e Trabajadoras*. Sao Paulo. IIEP.
- ISO.(2011). *Business Plan ISO/TC 229Nanotechnologies*.
- Jasanoff, S. (2011). The politics of public reason. En P. Baert y F.D. Rubio (eds.), *The politics of knowledge*. Abingdon: Routledge.
- Kearns, P., Gonzalez, M., Oki, N., Lee, K., Rodriguez, F. (2009). The safety of nanotechnologies at the OECD. En Linkov y Steevens (eds.), *Nanomaterials: risks and benefits*. Heidelberg: Springer, Netherlands.
- Kjaer, P. F. (2010a). La metamorfosis de la síntesis funcional. Una perspectiva europeo-continental sobre *governance*, derecho y lo político, trad. por Francisco Mujica. En *El Espacio Transnacional. Wisconsin Law Review*, 2010(2): 489-533.
- Kjaer, P. F. (2010b). A hybrid within a hybrid. Contextualising reach in the process of European Integration and Constitutionalisation. *European Journal of Risk Regulation*, 1(4): 383-396.
- Kjaer, P. F. (2014). Towards a sociology of intermediary institutions: The role of law in corporatism, neo-corporatism and *governance*. En Mikael Rask Madsen y Chris Thornhill (eds.): *Law and the formation of modern Europe: perspectives from the historical sociology of law*. Cambridge: Cambridge University Press, 117-141.
- Kjaer, P. F. y Vetterlein, A. (2018). Regulatory governance: rules, resistance and responsibility. *Contemporary Politics*, 24:5, 497-506, <https://doi.org/10.1080/13569775.2018.1452527>
- Koop, C. y Lodge M. (2017). What is regulation? An interdisciplinary concept analysis. *Regulation & Governance*, 11(1): 95-108. <https://doi.org/10.1111/rego.12094>
- Kuraj, N. (2019). *REACH and the Environmental Regulation of Nanotechnology – Preventing and Reducing the Environmental Impacts of Nanomaterials*. Londres: Routledge.
- Kuzma, J., Roberts, J. P. (2016). Is adaptation or transformation needed? Active nanomaterials and risk analysis. *J Nanopart Res*, 18, 215. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3506-y>
- Lamprou, A. y Hess, D. (2016). Finding political opportunities: Civil society, industrial power, and the governance of nanotechnology in the European Union. *Engaging Science, Technology, and Society*, 2: 33-54.
- Levi-Faur, D. (2011). Regulation and regulatory governance. En David Levi-Faur (ed.), *Handbook on the politics of regulation*. Edward Elgar: Cheltenham, 3-21.
- Mayntz, R. (2006). *Governance en el Estado Moderno*. *Revista PostData*, 11: 103-117, abril.
- Malsch, I., Subramanian, V., Semenzin, E. et al. (2015). Empowering citizens in international governance of nanotechnologies. *J Nanopart Res*, 17.
- Martins, P. (2014). Onde as ciencias e ativismo se Encontran. En *Red De Redes Por La*

- Justicia Ambiental: Poder Constituyente Y Luchas Ambientales*. Hacia Una Red De Redes En América Latina. Córdoba: Ediciones De Autor Sja/ UNC.
- Martins, P. y Dulley, R. (2008). *Nanotecnologia, Sociedade e Meio Ambiente. Trabalhos apresentados no tercer seminario internacional*. Sao Paulo: Xamá.
- Moller, K. (2016). A critical theory of transnational regimes: Creeping managerialism and the quest for a destituent power. En K. Blome (ed.), *Contested regime collisions: Norm fragmentation in world society*. Cambridge: Cambridge University Press, 255-280.
- Nanoaction. (2007). *Principios para la supervisión y de nanotecnologías y nanomateriales*, trad. Por Rel-Uita. International Center For Technology Assesment (Icta).
- Nussbaum, L. (2016). Mediation as regulation: Expanding state governance over private disputes. *Utah Law Review*, 206 (2): 361.
- OECD/Korea Development Institute. (2017). *Improving regulatory governance: Trends, practices and the way forward*. París: OECD Publishing.
- Patenaude, J., Legault, G., Beauvais, J. et al. (2015). Framework for the analysis of nanotechnologies' impacts and ethical acceptability: Basis of an interdisciplinary approach to assessing novel technologies. *Sci Eng Ethics*, 21: 293-315. <https://doi.org/10.1007/s11948-0149543-y>
- Porcari, A., Borsella, E., Benighaus, C. et al. (2019). From risk perception to risk governance in nanotechnology: a multi-stakeholder study. *J Nanopart Res*, 21: 245. <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4689-9>
- Rhodes, Raw. (2007). Understanding Governance: ten years on'. *Organization Studies*, 28(8): 1243-1264.
- Rosenau, J. (2000). Governança, ordem e transformação na política mundial. En Rosenau, James e Czempiel, Ernst Otto, *Governança sem governo. Ordem e transformação na política mundial*. Brasília: Editora UnB.
- Roco M. C. y Bainbridge W. S. (2002). Converging technologies for improving human performance: Nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science. National Science Foundation. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0359-8>
- Saldívar Tanaka, L. (2020). Regulación blanda, normas técnicas y armonización regulatoria internacional, para la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13 (24): 1e-27e. UNAM, México. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.24.69621>
- Saldívar Tanaka, L. (2019). Regulando la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 12 (22): 37-57, UNAM, México. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.63140>
- Satterstrom, F. K. et al. (2009). Considerations for implementation of nano manufactured nanomaterial policy and governance. En Linkov y Steevens (eds.), *Nanomaterials: risks and benefits*. Heidelberg: Springer Netherlands.
- Shaffer, G. C. (2015). How the WTO shapes RG. *Regulation & Governance*, 9: 1-15. <https://doi.org/10.1111/regg.12057>
- Teubner, G. (2010). Fragmented foundations: Societal constitutionalism beyond the

- Nation State. En P. Dobner y M. Loughlin (eds.), *The twilight of Constitutional Law: Demise or transmutation?* Oxford: Oxford University Press, 327-341.
- Teubner, G. (2012). *Constitutional Fragments. Societal constitutionalism in globalisation*. Nueva York: Oxford University Press.
- Vila Seoane, M. (2014). los desafíos de la nanotecnología para el “desarrollo” en Argentina. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7(13), julio-diciembre. UNAM, México.
- Walker, N. (2008). Beyond boundary disputes and basic grids: Mapping the global disorder of normative orders. *International Journal of Constitutional Law*, 6 (3-4): 373-396.
- Wickson, F., Delgado, A. y Kjølberg, K. (2010). Who or what is ‘the public’? *Nature Nanotech*, 5: 757-758 (2010). <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.197>
- Wullweber, J. (2015). Innovation policies and the competition State: The case of nanotechnology. En Van Der Pijl, Kees (ed.), *Handbook of the international political economy of production*. Edward Elgar Publishing, 43-58.

Sandbox regulatorio como fuente de derecho en caso de la disrupción nanotecnológica brasileña

The regulatory sandbox as a source of law in the nanotech disruption case in Brazil

Daniela Pellin,*[†] Wilson Engelmann**

ABSTRACT: This article aims to consolidate the regulatory sandbox as a source of normative production to address the legal regulation of the development and application of nanotechnology. The paradox that exists between nanotechnology and risk, both inherent to development, is presented as a problem for society as it must deal with limits. For this, a legal regulation is expected. But, what legal regulation is being considered? Certainly, that produced by social intervention as a factor for validating and managing the limits of this paradox. In this sense, following another Brazilian initiative, The regulatory sandbox is presented as a possibility of legal regulation of the development and application of nanotechnology. To achieve this objective, it uses the project of the Brazilian securities commission that, together with the Inter-American Development Bank, implemented the so called sandbox normative process in order to legally regulate technology-based financial companies at an early stage. In addition, meeting the needs of risk control and favoring the development of society. The methodology used is hypothetical-inductive which qualitative approach and with a systemic-constructivist approach. As a research technique, it uses data collection, document and literature review. The results suggest that in the case of nanotechnology development and given the impossibility for the constituent legislator to know such an object, the regulatory sandbox can enable a dynamic regulation and democratic norms where all actors participate in the construction of the regulatory process, therefore impacting decision-making about innovation.

KEYWORDS: nanotechnology, regulatory sandbox, regulatory impact analysis, source of law.

RESUMEN: Consolidar el sandbox regulatorio como fuente de producción normativa para abordar la regulación legal del desarrollo y aplicación de la nanotecnología es el objetivo de este artículo. Dada la paradoja existente entre la nanotecnología y el riesgo, ambos inherentes al desarrollo, la cual se presenta como un problema para la sociedad al tener que lidiar con límites, sería deseable conseguir una regulación legal. Pero, ¿qué regulación legal se está considerando? Ciertamente, a la producida por la intervención social como factor de validación y gestión de los límites de esta paradoja. En este sentido, y retomando otra iniciativa brasileña, el sandbox regulatorio se muestra como una posibilidad de regulación legal del desarrollo y aplicación de la nanotecnología. Para lograr este objetivo, nos basaremos en el proyecto de la Comisión de Valo-

Recibido: 25 de febrero, 2021. Aceptado: 9 de agosto, 2021. Publicado: 17 de septiembre, 2021.

* Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Direito do Mestrado Profissional em Direito da Empresa e dos Negócios.

** Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Programa de Pós-Graduação em Direito Acadêmico (Mestrado e Doutorado) e Coordenador Executivo do Mestrado Profissional em Direito da Empresa e dos Negócios.

[†] Autora de correspondencia: dpellin@unisinis.br



res de Brasil, la cual, junto con el Banco Interamericano de Desarrollo, implementó el proceso normativo denominado sandbox, para regular legalmente las empresas financieras de base tecnológica en una etapa temprana, además de atender las necesidades de control de riesgos y favorecer el desarrollo de la sociedad. La metodología utilizada es hipotético-inductiva, de naturaleza cualitativa y de enfoque sistémico-constructivista. Como técnica de investigación, se utiliza la recolección de datos, documentos, y el análisis de literatura. Los resultados indican que en el caso del desarrollo nanotecnológico y ante la imposibilidad de que el legislador constituyente conozca tal objeto, el sandbox regulatorio puede dar paso a normas dinámicas y democráticas donde todos los actores participan en la construcción del proceso regulatorio, impactando, por tanto, la toma de decisiones sobre la innovación.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, sandbox regulatorio, análisis del impacto normativo, fuente del derecho.

Introducción

El complejo sistema que impregna el desarrollo nanotecnológico es de difícil regulación en tanto parte del conjunto de nuevas tecnologías que componen el complejo de la denominada Revolución 4.0 la cual habilita el auge de la industria 4.0 (Schwab, 2016 y 2018). Las nanotecnologías se desarrollan en diversas áreas científicas y se tratan como insumos productivos para la industria 4.0, cuyos resultados son ahorros de costos, ganancias en la eficiencia productiva y mejores resultados para el consumidor. El problema radica en el control legal y regulatorio sobre el riesgo y el desarrollo nanotecnológico junto con las numerosas recomendaciones técnicas producidas a nivel mundial, no obligatorias, pero indicativas. El objetivo general es demostrar que la lógica sistémica y el lenguaje comunicativo de la corregulación del carácter experimental propuesto por el sandbox deben ser aplicados y tratados como fuente del derecho para el tratamiento legal de las nanotecnologías. La hipótesis es que de este modo será factible regular el sistema y equilibrar las fuerzas del juego económico: desarrollo, riesgo, consumo sostenible y democracia. Esto es posible porque, desde que se promulgó en Brasil la Ley 13.874, de 20/9/2019, cualquier iniciativa regulatoria debe ser sometida al análisis de impacto normativo para frenar el abuso regulatorio o su imposibilidad, cuyo propósito es detener el incumplimiento, contribuir con la garantía de los derechos fundamentales y con los objetivos de implementar políticas públicas. Por tanto, la democratización del proceso normativo, al favorecer la participación de todos los interesados, puede implicar la construcción de normas y el cumplimiento voluntario de las reglas, actuando como fuente del derecho para insertarse en el ordenamiento jurídico.

El escenario del *diseño* metodológico de la regulación de la nanotecnología

En la academia jurídica, se ha discutido ampliamente la posibilidad o imposibilidad del derecho actual para atender las necesidades de la sociedad de la información (Brasil, 2000) y las tecnologías disruptivas de la industria 4.0.

Las nuevas tecnologías son ciertamente propiedad del sistema económico, captadas por la perspectiva de desarrollo y crecimiento exponencial, y mismas que colocan a Brasil en la condición de proveedor de bienestar y competidor internacional (Pellin, 2019).

Por otra parte, la nanotecnología es parte de una agresiva ruptura histórica; se la trata como insumo productivo, desarrollada y aplicada en diversos sectores como el farmacéutico, el químico, físico, médico, o en robótica, por mencionar algunos. Considerando el ínfimo tamaño de un nanómetro (nm), invisible a simple vista, y con una dimensión de $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, es posible, utilizando nanotecnología, alterar las propiedades de los materiales desde los átomos y las moléculas y, en consecuencia, modificar las características y propiedades de los productos que los utilizan. Por esta razón, los resultados pueden ser increíbles, tanto en nuevos materiales, como en términos de nuevas eficiencias, nuevas economías, y nuevos modelos o formas de consumo. Pese a ello, es notorio que no se dedique la misma energía a la evaluación e investigación de los riesgos de la posible interacción de estos materiales nanoestructurados cuando entran en contacto con la salud humana y la preservación del medio ambiente (Pellin, 2019).

En la prisa de Brasil por superar el retraso tecnológico reflejado en el desarrollo (Beck, 2011), la toma de decisiones sobre qué desarrollar e innovar no adopta como premisa la evaluación de riesgos, indispensable para la seguridad del desarrollo sostenible.

Tomando en cuenta el diagnóstico anterior, se busca, a través del derecho, una solución política, económica, técnica y científica para equilibrar las fuerzas de la economía. Haciendo un seguimiento de todas las investigaciones realizadas hasta el momento, es posible darse cuenta de que existe un vacío jurídico que es llenado por nuevos patrones de comunicación y lenguaje, y que se refieren al deber de promover el desarrollo económico y sostenible, así como a la aplicación del principio de precaución en la toma de decisiones económicas (Pellin y Engelmann, 2018). Entonces, ¿por qué esta perspectiva no es atendida en Brasil? La respuesta es simple: se trata de un país de modernidad tardía (Beck, 2011) y bajo un patrón sistémico cultural (Pellin y Engelmann, 2018) que impide el avance tecnológico seguro y deseable.

Por ello, la investigación es particularmente necesaria en este ámbito, con miras a atender el escenario disruptivo como un concepto que significa interrumpir, reiniciar un proceso, e impulsar una propuesta nueva, diferente, innovadora, inventiva, que las tecnologías traen consigo en esta era de la Revolución industrial 4.0 (Schwab, 2016). Se exige también del derecho que sea disruptivo, que provoque una ruptura en el precepto histórico de su construcción ontológica de significado, permitiendo la innovación en los procesos creativos de nuevas fuentes del propio derecho.

Como impacto de este escenario de innovación tecnológica, la Comisión de Valores de Brasil ideó la aplicación de la figura del sandbox en el caso de las FinTechs (tecnologías financieras: las denominadas empresas financieras de

base tecnológica que operan en territorio virtual) como medio para enfrentar el riesgo, el desarrollo y la regulación legal eficiente, capaz de conformar comportamientos de manera voluntaria y adherida por todos los interesados en el sector.

El sandbox surgió en Estados Unidos en 2012 de la mano de la Oficina de Protección Financiera del Consumidor. Después de tres años, el organismo responsable del mercado financiero británico, la Financial Conduct Authority, se ha sumado al modelo.

El término sandbox viene de la informática. Se trata de establecer un entorno virtual para la experimentación de nuevos programas en sistemas operativos ya funcionales. En la práctica, los límites de su alcance están prestablecidos para que, si hay fallos en el programa probado, el sistema no se vea comprometido (Feigelson *et al.*, 2019). Se trata, por tanto, de una metodología de experimentación que, en este caso, se nutre de una regulación y un control supervisados, pero flexibles en la medida en que uno puede soportar el régimen jurídico que envuelve su actividad. Hoy en día, hay más de veinte países adheridos al proceso de regulación como política pública de incentivos y control (Jenik y Lauer, 2017).

Se ha comprobado la posibilidad de aplicar el mismo acercamiento para tratar los asuntos legales de la regulación de las nanotecnologías. Adicionalmente, en este proceso regulatorio, todos los actores deben estar involucrados y capturados por la autorregulación común. Es decir, la corregulación que involucra al Estado democrático y a los múltiples actores e intereses involucrados. Como resultado, se eleva el nivel sistémico deseado, comprometido y responsable, y se construye una respuesta efectiva que permita al sistema jurídico, sus operadores y a los tribunales responder adecuadamente al avance de la industria 4.0.

El contexto de la nanotecnología y algunas implicaciones del desarrollo

Las nanotecnologías son lo que se ha llamado nuevas tecnologías disruptivas, entendidas por tanto como aquellas que cambian los patrones culturales de una sociedad, en términos de economía, entretenimiento, relaciones, comunicación, consumo, política, gobierno, por mencionar algunos. El cambio está en todas partes, por lo cual, según Schwab (2016), se inaugura una nueva era —la Cuarta Revolución Industrial: la Revolución 4.0—. Se trata de cambios no vistos con anterioridad y dándose a una marcada velocidad, amplitud y profundidad. Son cambios de impacto sistémico que fusionan inteligentemente las nuevas tecnologías, contexto en el cual se denota la presencia de interacciones entre los dominios físico, digital y biológico.

En el caso de las nanotecnologías desarrolladas para impactar en las propiedades de los materiales, haciéndolos más resistentes, posibles de reciclar y adaptables con aplicaciones inteligentes de autorreparación y autolimpieza;

metales con memoria para volver a su forma original; cerámicas y cristales que transforman la presión en energía, entre otros, conjuntan algunos de los componentes de la canasta de inversiones, con perspectivas de desempeñar el papel fundamental en la “mitigación de los riesgos globales que enfrentamos” (Schwab, 2016: 26).

En este escenario, la prisa por la investigación y la competencia global conjugan el *locus* del desarrollo de las nanotecnologías junto con los riesgos para los sistemas naturales y sociales ante las incógnitas o las incertidumbres científicas sobre las interacciones de los nanomateriales con los humanos y el medio ambiente, comprendidas en toda su complejidad (Pellin, 2019). Muchas implicaciones están involucradas en esta complejidad, especialmente en lo que respecta a las condiciones sensibles de los países en desarrollo como Brasil, aún distante del ideal de acuerdo con los estándares de la globalización económica (Brasil, 2000). Se constata, cuando se trata de las mejoras en el perfil empresarial, cultural y educativo del país, que el nivel de Brasil está considerablemente por debajo de los patrones razonables (Cai, 2013), y no tiene las condiciones para apropiarse del conocimiento y la innovación por encima de los patrones deseables en la Constitución Federal de 1988, apoyados en el escenario competitivo global y la política nacional de innovación. Además, los innumerables requerimientos a ser enfrentados y contraídos —según Beck (2011), por la modernidad posterior— cuestionan el avance de la nanotecnología sin regulación específica, al proyectar un escenario sin control y de mayor riesgo.

Después de la edición del *Libro verde* (Brasil, 2000), en el que el país asumió el compromiso global de ajustarse a los patrones de la sociedad de la información; en 2002 se publicó la edición del *Libro blanco* (Brasil, 2002), donde se traza un programa nacional de desarrollo del país de 2001 a 2012 en materia de ciencia, tecnología e innovación, demarcando como objetivo la reducción de las desigualdades regionales como distintivo de justicia y bienestar social. Además, en esta perspectiva de desarrollo, se incluyeron las empresas socias del Estado, tanto las nacionales, de cualquier tamaño, como las extranjeras en territorio nacional.

Es del *Libro blanco*, consecuencia del *Libro verde*, del que se extrae el concepto de innovación brasileña, entendido como “un fenómeno complejo y multidimensional, que presupone la presencia y articulación de un elevado número de agentes e instituciones de variada naturaleza con lógicas y procedimientos distintos; metas de corto y largo plazos; potencialidades específicas, restricciones y motivaciones diversas” (Brasil, 2002: 26). Sin embargo, con el *Libro azul* (Brasil, 2010) se ha reforzado este concepto considerando la propuesta del país de adoptar como objetivo estratégico el desarrollo científico y tecnológico innovador, basado en una política de reducción de las desigualdades regionales y sociales, exploración sustentable de la riqueza del territorio nacional y fortalecimiento de la industria. En consecuencia, añadiría valor a la producción y exportación a través de la innovación y el refuerzo de la importancia internacional de la ciencia y la tecnología.

La agenda principal para la concretización del *Libro azul* es propiciar la innovación para el consumo masivo:

La economía brasileña se encuentra en una fase especial de su trayectoria histórica. Hay evidencias inequívocas de que en los últimos años se ha iniciado un proceso que probablemente se afirme como un nuevo ciclo de desarrollo a largo plazo: el crecimiento con redistribución de la renta a través de la dinámica de la producción y el consumo de masas. Se trata de un viejo sueño de la sociedad brasileña, que se presenta en el momento actual de la vida nacional como una tendencia prometedora y absoluta. (Brasil, 2010: 29).

Los datos confirman que esta política pública gubernamental ha funcionado y acelerado el proceso de acceso a los bienes y servicios de consumo masivo. Algunos sectores, como el sector industrial de los cosméticos, ganan visibilidad, pues con la innovación nanotecnológica aplicada a los procesos y productos de higiene personal, cosmética y perfumería, se destacó a nivel nacional e internacional.

La Asociación Brasileña de la Industria de la Perfumería, Cosmética e Higiene Personal presentó en el documento institucional Panorama Sectorial de 2019 (ABIHPEC, 2019) datos relacionados con el desempeño sectorial. Según se informó, se destina un millón de reales a inversiones que marcan huella en la economía brasileña en el plazo de un año, con impactos socioeconómicos considerables en comparación con otros sectores industriales como la agroindustria e industrias en general (ABIHPEC, 2019: 42), (tabla 1).

Brasil es el cuarto mercado mundial de consumo de productos de higiene personal, perfumería y cosmética, con una cuota de mercado global del 6.2% y un total de 30 mil millones de dólares en ventas al consumidor en 2018, según la información recogida por ABIHPEC de Euromonitor. El país está solo detrás de Estados Unidos (EUA) con el 18.3% (89,500 millones de dólares), China con 12.7% (62,000 millones de dólares) y Japón con 7.7% (37,500 millones de dólares). En América Latina, Brasil tiene el 48.6% del mercado de la región y en cuanto al mercado mundial, América Latina tiene el 12.7% (ABIHPEC, 2019: 43). Hace tiempo que es el sector que más invierte en investigación, desarrollo e innovación: 1.9 millones de reales en 2018; así como el sector que más in-

TABLA 1. Desempeño de la industria de la perfumería, cosmética e higiene personal (PCPH) en Brasil según datos reportados en 2019.

Impactos socioeconómicos	PCPH	Agronegocios	Industria en general
Producción	3.85 millones de reales	2.96 millones de reales	3.72 millones de reales
Ocupación	38 puestos de trabajo	80 puestos de trabajo	37 puestos de trabajo
Impuestos	601 mil	171 mil	354 mil
Salario	450 mil	340 mil	421 mil

Fuente: Elaboración propia con base en ABIHPEC (2019).

vierte en publicidad con 9.3 millones de reales en la marca y 3.7 millones de reales en activos (ABIHPEC, 2019: 43).

Actualmente, hay 2,794 empresas registradas en la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria. La mayor concentración se encuentra en el sudeste, con 1,685, seguido por el sur, con 550, el noreste, con 309, medio oeste con 197 y el norte, con 55. Cabe precisar que en 2018, hubo un aumento del 2.8% en el número de empresas registradas en la Agencia, debido a la necesidad de mantenerse al día con la competitividad del mercado, la demanda de innovación, calidad, seguridad y efectividad de productos (ABIHPEC, 2019: 43).

Es un mercado prometedor en marcha y con perspectivas de progreso y crecimiento exponencial por lo que los riesgos no pueden ser marginados. No obstante, el sector en Brasil no enfrenta su responsabilidad extendida. Un ejemplo de ello son los dos Proyectos de Ley (Brasil, 2013) que fueron archivados en la Cámara de Diputados, a pesar de que la exposición de motivos reforzaba los riesgos desconocidos para los seres humanos (consumidor) y el medio ambiente, así como la necesidad de una información clara y precisa para el consumidor sobre productos de nanoingeniería.

En la Cámara de Diputados, el Proyecto de Ley 6741/2013, ingresado el 31 de enero de 2019, trató sobre la implementación de la Política Nacional de Nanotecnología, la producción, el destino de los rechazos y el uso y aplicación de las nanotecnologías en el país. La proposición de Ley 5133/2013, trataba sobre el etiquetado de productos hechos con nanotecnología. En el Senado Federal, el proyecto de Ley 131/2010, presentado el 1 de agosto de 2013, trató de las determinaciones a la vigilancia sanitaria del etiquetado y el seguimiento de los medicamentos, drogas, insumos y correlativos farmacéuticos, cosméticos, agentes sanitizantes y otros productos producidos con el uso de la nanotecnología, especialmente en lo que respecta a la información en las etiquetas, prospectos y materiales publicitarios. Del mismo modo, la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, al tomar la iniciativa de regular el sector en la agenda normativa 2013-2015, archivó el procedimiento por tener temas más importantes que tratar en ese momento, aunque destacó en el documento institucional, la temeridad del desarrollo nanotecnológico sin medición y control científico (Pellin, 2019).

El hecho es que en el ambiente en que ocurren las revoluciones científicas, las probabilidades de las innovaciones tecnológicas son variables, justamente porque las revoluciones traen consigo “episodios de desarrollo no acumulativo, en los que un paradigma más antiguo es sustituido total o parcialmente por uno nuevo, incompatible con el anterior” (Kuhn, 2013: 177), promoviendo un escenario de crisis en el que se reestructura la política y el proceso de toma de decisiones en torno a las perspectivas del desarrollo, dígase, por ejemplo, en Brasil, un país, como se dijo, de modernidad tardía (Beck, 2011). Además, en la modernidad ello ha significado la priorización del desarrollo económico a través de la innovación tecnológica sobre la certidumbre científica para preservar un cierto nivel de soberanía nacional y competitividad global, incluso si los desajustes

son compartidos internamente por toda la comunidad. Este proceso debe incluir el conocimiento, el consentimiento y el respaldo de la OCDE (Pellin, 2019).

Con un reflejo directo, el escenario jurídico también se ve impactado por la revolución tecnológica, sobre todo teniendo en cuenta si es disruptiva, como en el caso de Revolución 4.0 en la que se destaca la nanotecnología. Dado que esta altera radicalmente el sistema socioeconómico en su conjunto, lo hace, en consecuencia, también en el derecho, el cual ha sido alcanzado por este proceso y forzosamente modificado. A nivel de la revolución tecnológica y la explotación económica del desarrollo científico, lo que hay en el derecho refleja el mismo entorno tecnológico, porque el sistema positivo del derecho no está en condiciones de incorporar las innovaciones tecnológicas con el marco jurídico que en su día se construyó. Se trata de un periodo de ruptura con los viejos paradigmas, en todos los sentidos. Por lo tanto, la fuente directa —la ley (Art. 4, Ley de Introducción a las Normas del Derecho Brasileño-LINDB)— no puede regular el movimiento de innovación tecnológica en constante dinamismo, en tanto que los legisladores no tengan las condiciones técnicas suficientes para tal alcance.

Asumir que las fuentes indirectas del derecho como los principios generales, la analogía y la costumbre (Art. 5, LINDB) pueden albergar innovaciones de cualquier tipo y que los tribunales pueden atender las lagunas en caso de conflictos es simplemente una ilusión, pues hay que tomar en cuenta que lo nuevo que se experimenta no tiene antecedentes históricos y, en consecuencia, no tiene condiciones para proporcionar una situación análoga razonable y coherente ni responde al tránsito socioeconómico en la sociedad de la información. Lo anterior se debe a que existe una relación directa de equivalencia entre las alternativas que tienen los tribunales para juzgar, derivadas de las fuentes del derecho y la asimetría de información existente en la cadencia de hechos nanotecnológicos que necesariamente escapan a este funcionamiento del sistema jurídico por este universo desconocido.

Los tribunales juzgan por el conocimiento que tienen del derecho disponible en el sistema jurídico una vez cerrado en sí mismo y dependiente del lenguaje de comunicación interna (fuentes directas e indirectas) que ha creado para servir a la sociedad (Bobbio, 2006). Ocurre que en este cierre, los nuevos acontecimientos, como el universo nanotecnológico —que no tiene conformación jurídica—, pueden carecer de respuestas judiciales o atenderlas erróneamente. De ahí la necesidad de que múltiples actores ajenos a estas fuentes tradicionales del derecho encuentren y fijen estándares normativos para la nanotecnología de modo que, al construirlos, los tribunales dispongan de alternativas legales coherentes y razonables para aplicarlos. En este sentido, Luhmann (2016) considera que:

Con la ayuda de la relación asimétrica entre la legislación y la jurisprudencia, y de los medios conceptuales derivados (como la doctrina de las fuentes del derecho), se pretende evitar la circularidad que supondría admitir que el Tribunal 'crea' el derecho,

aunque 'lo aplique'. [...] Se da la circunstancia de que el círculo no se produciría si los tribunales, en situaciones en las que no pueden 'encontrar' el derecho, pudieran conformarse con un *no-límite* (no está claro). Sin embargo, esto no se les permite —y no se les permite desde el punto de vista del derecho. (Luhmann, 2016: 409-410).*

Finalmente, permitir la ciencia del derecho (Miranda, 1972), lograda a través de la interpretación y argumentación jurídica construida por los operadores del sistema jurídico interno, incluyendo los tribunales, es insatisfactorio, dada la distancia, el vacío temporal (Ost, 1999), y la brecha entre los hechos tecnológicos y la expectativa de una respuesta jurídica eficiente y eficaz. De acuerdo con las necesidades que presenta este escenario, en contraste con la falta de conocimiento técnico, la velocidad, las disrupciones, el diagnóstico y el pronóstico, hay que considerar que:

[...] el tiempo vivido no es en tiempo real: a veces puede ser más rápido; a veces puede ser más lento. Las transformaciones del mundo que hemos vivido en los últimos años, ya sea por la crisis que precipitó un sistema de poder que parecía muy sólido y que pretendía representar el futuro del planeta, o por la rapidez del progreso técnico, nos dan el doble acortamiento y aceleración de los tiempos. (Bobbio, 2004: 94).*

Los investigadores, en sintonía con la propuesta de Revolución 4.0, deben contribuir, no solo con el tratamiento de las fuentes del derecho que está ahí, asomándose a nuevas perspectivas, si es posible, sino también insertando otras fuentes normativas, dentro de este sistema global, en la construcción de otro derecho. También deberían cuestionar el sistema interno, que necesita mantener las bases de soberanía bien definidas.

En esta nueva era del derecho y en esta era de nuevos derechos, se dice que “el derecho es una figura deóntica y, por tanto, es un término de lenguaje normativo, es decir, un lenguaje en el que se habla de normas sobre normas” (Bobbio, 2004: 94). Esto significa que no se trata de una emanación del poder estatal que se debilita (Bobbio, 2004: 24), ni derechos que corresponden directamente a obligaciones legislativas, sino, más bien, “(...) de la existencia de un poder normativo, en el que por 'existencia' se entiende tanto el mero factor externo de un derecho histórico o existente como el reconocimiento de un conjunto de normas como guía para la propia acción” (Bobbio, 2004: 94). Esto se refleja en la ampliación del espectro de legitimidad a la construcción normativa, es decir, de los múltiples actores sociales que se apropian de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, y que comienzan a regular conductas colectivas como fuentes de derecho que, a su vez, deben insertarse en el sistema jurídico con reconocida duración, vigencia y eficacia, capaz de generar deberes como expresión del propio derecho.

* Traducción de los autores.

El sandbox regulatorio y la viabilidad de la propuesta sobre el caso de la nanotecnología

En el universo del sistema tecnocientífico, *locus* de las nanotecnologías, existe una propuesta pluralista de la que se derivan valores, principios y reglas que pretenden establecer la estructura jurídica a partir de la cual se erige la Industria 4.0 y, con ella, la organización de los estándares de lenguaje y comunicación de este sistema. Las operaciones de este sistema deben estar respaldadas por las estructuras normativas, garantizando la seguridad del propio sistema, así como de sus usuarios y de los sistemas ambientales y sociales en toda su plenitud sistémica.

Este régimen normativo plural (Pellin, 2019) que abarca el universo de desarrollo y aplicación de la nanotecnología contiene, por un lado, principios europeos (EU, 2009) y mundiales (OCDE, 2015) y, por otro, normas técnicas emanadas de la Organización Internacional de Normalización (ISO, 2005). También cuenta con normas constitucionales internas, Derechos Humanos (Ruggiu, 2011) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), previstos en la Agenda 2030 (Pellin y Engelmann, 2019), que deben respetarse y cumplirse en cada etapa del desarrollo nanotecnológico y en cada fase del ciclo de vida de los nanomateriales y nanoproducidos.

Se trata de un régimen jurídico y técnico que no emana del poder estatal como agente político de coerción, sino de estructuras de valores y principios que surgen colectivamente de múltiples actores que pretenden conformar —y de hecho confirmar— comportamientos colectivos a partir de la comunicación generalizada y sectorial de dichas estructuras. Hay un cambio significativo en los patrones culturales, en este caso, legales y técnicos del sistema en el que se inserta la comunicación estructural. Sucede que las estructuras solo tienen valor real cuando se utilizan para la asociación de eventos comunicativos; las normas, solo en la medida en que se citan explícita o implícitamente; las expectativas, únicamente en el momento en que se expresan a través de la comunicación (Luhmann, 2016). Y, como resultado de esta operación de comunicación de valores y principios por parte de múltiples actores del sistema, surge un sistema jurídico más acorde con la realidad circundante de la Industria 4.0.

Según Jasanoff (2011), la “Ciencia Reguladora” es un dominio distinto de la producción científica, responsable de las demandas epistémicas y normativas de una manera que explica su vulnerabilidad a los desafíos tanto de la ciencia como de la política. En este universo de comunicación científica, técnica y política, Engelmann sostiene que es necesaria la construcción de una “Ciencia Reguladora” que pueda estructurar este pluralismo de intereses, capaz de orientar el desarrollo y aplicación de las nanotecnologías para abarcar todo el ciclo de vida de un producto o proceso que hace uso de la nanotecnología (Engelmann, 2018). Desde esta perspectiva y como una de las formas de producción normativa, una de las posibilidades emergentes reside en el sandbox

insertado en el sistema regulatorio interno. La legitimidad de la propuesta ha sido confirmada en Brasil con la reforma del la LINDB (Art. 20 a 30), la edición de la Ley de Libertad Económica No. 13.874/19 (Art. 5), y la inserción de la metodología de análisis de impacto normativo (AIR) en el sistema sociojurídico. También apoya la propuesta el art. 174 de la Constitución Federal que, desde 1988, interfiere en el estado de los asuntos económicos para equilibrar las fuerzas del juego económico, por un lado, y para priorizar la empresa privada en la explotación de la actividad económica, por otro. Para ello, regula, supervisa, fomenta y planifica.

Sin embargo, para el nuevo estado nanotecnológico, es a partir de la reforma del la LINDB, que la ampliación de los espacios políticos de construcción normativa guiada por criterios de necesidad y eficiencia han ganado estructura, lenguaje propio y operatividad. Se ha posibilitado que los múltiples actores sectoriales tomen la iniciativa normativa en interés general de los implicados más allá de la actividad estatal, como se desprende de la lectura del artículo 29 de dicha Ley: en cualquier órgano, o poder de la edición de actos normativos por parte de la autoridad administrativa, salvo las que sean una mera organización interna, podrá ser precedida de una consulta pública a los interesados, preferentemente por medios electrónicos, que deberá ser considerada en la decisión. Además, pero no por ello menos importante, se prevé en el artículo 23 que, en caso de imposición de nuevos deberes o nuevas condiciones de derecho, el agente regulador deberá establecer un régimen de transición temporal para que el nuevo deber, o nuevo comportamiento cultural sea proporcional, equitativo, eficiente y sin perjuicio de los intereses generales.

Estas dos disposiciones previstas en la estructura del sistema se complementan con la reciente Ley de Libertad Económica, la cual, en su artículo 5º dispone que la regulación por parte del Estado debe, desde entonces, preceder a la metodología de análisis de impacto normativo; en el cual reside la estructura del sandbox regulatorio y la propuesta de regulación del sistema nanotecnológico.

El sandbox, como se mencionó, está siendo utilizado en el momento de esta investigación por la Comisión de Bolsa y Valores (CVM) para regular el mercado de *startups* de FinTechs (Silva y Costa, 2019). Su objetivo es llevar este tipo de negocio tecnológico, propio de la Revolución Industrial 4.0, a la regulación legal para garantizar la sostenibilidad del negocio, la competencia leal con los bancos y la seguridad de los usuarios. Para poder construir el sandbox, la CVM está utilizando el análisis de impacto normativo a través de la consulta pública instituida por la Ordenanza CVM/PTE 48/2019.

El sandbox aplicado por la CVM es el resultado del establecimiento del “Laboratorio de Innovaciones Financieras” como un proyecto conjunto entre la Asociación Brasileña de Desarrollo, el Banco Interamericano de Desarrollo y la CVM, para, en un esfuerzo conjunto, desarrollar el sector financiero que opera a través de la innovación tecnológica. En este contexto, cabe advertir

que Brasil “...ya posee el 32.7% de toda la actividad de *startups* financieras en esta región del continente...” (Silva y Costa, 2019).

El referido decreto establece un procedimiento específico que precede a la regulación sectorial de las FinTechs por parte de la autoridad local en igualdad de condiciones con el mercado de capitales, que incluye la regulación específica y temporal de carácter experimental. En este marco temporal de regulación especial, la autarquía recoge datos empíricos para analizar y evaluar el impacto de cualquier regulación sectorial, esto es, los beneficios y procedimientos más adecuados para aplicar la solución recomendada.

Lo importante durante el proceso de sandbox es que las empresas implicadas en el experimento regulatorio —es decir, la industria— entreguen datos a la autarquía y así reduzcan la asimetría informativa tan perjudicial para la competencia y la regulación eficiente. Según Mello:

En el mundo de la informática, un *sandbox* es un entorno de pruebas cerrado diseñado para experimentar de forma segura con proyectos web o de software. Recientemente, y dentro de la acepción adoptada por el modelo de la CVM, el concepto se ha utilizado también en la economía digital para referirse a los entornos de prueba reglamentarios: cimientos de nuevos modelos de negocio que no están protegidos por la regulación actual ni supervisados por las instituciones reguladoras, pero que contienen en sí mismos cierto potencial de riesgo. (Mello, 2019).*

Según Silva y Costa, el sandbox regulatorio empleado por la CVM se utiliza desde hace tiempo en Reino Unido, Australia, Singapur y Hong Kong, y se caracteriza por “programas de duración limitada que permiten a las FinTechs, en fase inicial, probar sus ofertas en un entorno de mercado limitado, bajo la supervisión regulatoria de las agencias pertinentes, pero sin tener que obtener una licencia completa y someterse a las innumerables normas regulatorias de las innovaciones tecnológicas actuales” (Silva y Costa, 2019).

Con el fin de posibilitar el patrón metodológico de estandarización eficiente para todos los destinatarios y legitimados a la regulación, el gobierno federal, a través de la Casa Civil, elaboró la “Guía para la Elaboración de Análisis de Impacto Normativo” (Brasil, 2018) —el segundo párrafo único, del artículo 5° de la Ley de Libertad Económica No. 13.874/19. El documento trata el “diamante de la regulación” (Brasil, 2018), que significa elegir a través del marco, la mejor manera —además de la madurez del sistema socio-jurídico—, con la que el país aplicará el método a la intervención reguladora. Nótese que una de las modalidades de regulación ideal para cualquier sector es la corregulación, porque involucra la iniciativa pública y privada en la construcción de un patrón cultural de comportamiento económico que se asume como racional, virtuoso y proactivo.

* Traducción de los autores.

Según la Guía, la regulación compartida a la correulación:

[...] se produce cuando la industria desarrolla y administra sus normas, pero el gobierno proporciona apoyo legal para permitir su aplicación. En general, el gobierno establece normas o parámetros de calidad, o desempeño, permitiendo a los actores elegir la mayor forma de adecuar sus productos, procesos, servicios, y tecnologías, al desempeño esperado. (Brasil, 2018: 26).*

Por estas razones, lo ideal para el desarrollo de la industria 4.0, en donde se inserta la perspectiva disruptiva que trae la nanotecnología, será, a nuestro modo de ver, la aplicación del sandbox regulatorio experimental. Considerando que se presenta como una herramienta idónea para iniciar la regulación de la industria y, en consecuencia, orientar la toma de decisiones, generar bases de datos, y dirigir el control de los riesgos por parte de los múltiples actores e intereses involucrados durante el proceso reglamentario —a saber: laboratorios públicos y privados; empresas públicas y privadas; organizaciones representativas de los intereses ambientales y de los consumidores; agencias reguladoras complementarias; el propio gobierno a través del Ministerio de Ciencia, Tecnología, Comunicación e Innovación-MCTIC, por mencionar algunos.

En este sentido, estamos ante la Ley 4.0 para abordar las cuestiones tecnológicas 4.0 y, en consecuencia, sentar paulatinamente las bases de los avances en todas las áreas del derecho. El sandbox inaugura esta propuesta como una herramienta viable y hábil en la construcción de este derecho, completamente ausente en nanotecnologías. Y es que a decir de Feigelson:

[...] la regulación de las nuevas dinámicas puede darse en dos escenarios: (i) entorno de ausencia total de regulación. Es decir, espacios en los que no existen marcos legales ni estructuras instituidas para tratar los fenómenos en los que el principio de autonomía privada permite plenamente el desarrollo de la nueva dinámica (ej.: transporte privado a través de aplicaciones); y, (ii) entornos previamente regulados, pero no adecuadamente preparados para recibir las nuevas dinámicas creadas a partir del uso de las nuevas tecnologías (e.g.: FinTechs). (Feigelson, 2018).*

Feigelson explica que en Reino Unido, se ha aplicado el sandbox para volver a probar nuevos productos sin el riesgo de ser sancionado por el regulador que, a su vez, exige el cumplimiento de ciertas condiciones que se aplican adecuadamente al desarrollo nanotecnológico, a saber: i) consentimiento previo de los usuarios de nuevos productos; ii) límites financieros de las operaciones, e, iii) control de riesgos, como las dinámicas que detecten posibles fraudes (Feigelson, 2018). En Australia (ASICS, 2017), los requisitos son: i) innovación tecnológica en los productos; ii) demostración de benefi-

* Traducción de los autores.

cios a los usuarios, e, iii) información sobre gestión de riesgos y protección del consumidor

Para Josanoff (2011), la frontera entre la ciencia y la política no está pre-determinada, sino que se constituye a través de los propios procesos de asesoramiento de las instituciones políticas y de las pautas culturales que autorizan y, como resultado, condicionan la producción, recepción y asociación de conocimientos especializados para informar los procesos de regulación. Estos aspectos cumplen efectivamente el principio de precaución (Pellin y Engelmann, 2017) en la toma de decisiones sobre el desarrollo y el emprendimiento nanotecnológico y el tan ansiado control de riesgos para los sistemas sociales y ambientales de lo desconocido, desmedido y desinformado a la sociedad (según la escasez informativa al mercado). Por lo tanto, cumpliendo eficientemente con ahorro de tiempo, las inversiones y la seguridad precautoria, en la elaboración de normas legales se garantiza la continuidad del desarrollo, pero, desde entonces, sostenible democrático y legítimo, cuyo alcance deberá ser el cumplimiento de las agendas asumidas por la sociedad en cuanto a la información brasileña.

El papel principal podría ser asumido por la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, aunque la cartera pertenece al MCTIC, al ser un régimen especial (órgano independiente) y responsable del control de los productos y procesos destinados al consumo, cuya finalidad es precisamente la protección de la salud, tanto humana como de los ecosistemas, preocupándose por todo el ciclo de vida de un producto. El órgano MCTIC ya ha tenido la iniciativa infructuosa, debido a la absoluta falta de metodología e información sobre los datos generados por las nanotecnologías, así como el régimen jurídico inadecuado para el acceso a los datos almacenados y protegidos por el secreto industrial por los agentes de desarrollo, públicos y/o privados. Si el sandbox regulatorio de las nanotecnologías es conducido por la Agencia Nacional de Vigilancia Sanitaria, podría haber una garantía de eficiencia en los costos regulatorios, en la empresa nanotecnológica, y en la sociedad de manera rápida, democrática y efectiva.

Conclusiones

Dada la gran inversión en el desarrollo nanotecnológico y la aplicación de nanopartículas en productos y procesos destinados al consumidor, el riesgo ambiental y social está presente, debido a la falta de información técnico-científica sobre los posibles daños del uso de tal (nano)tecnología.

Teniendo en cuenta este contexto, la investigación tuvo como objetivo argumentar que el sandbox regulatorio puede servir como herramienta para construir un régimen legal que cubra los aspectos técnicos, científicos y legales, de acuerdo con las indicaciones sectoriales y los múltiples actores e intereses involucrados, de manera eficiente y experimental. También se advierte que este proceso de construcción puede ser facilitado por la Agencia Nacional

de Vigilancia Sanitaria y deben establecerse ciertas condiciones como contrapartida a favor del ámbito regulatorio, como se ha hecho en otros países. Por lo tanto, es necesaria la adición de nuevas fuentes de Derecho 4.0, siendo su expresión inicial el sandbox regulatorio. El camino indicado para atender el proceso reglamentario de lo que no tiene normas regulatorias es analizar y evaluar que, a partir del debilitamiento del Estado, la corregulación entre los múltiples actores de normas jurídicas se ajuste a los altos estándares culturales sistémicos para el ejercicio de la actividad económica y la promoción del desarrollo económico según las directivas de la OCDE, así como de las derivadas del régimen jurídico-político establecido por la LINDB, la Ley de Libertad Económica, la Constitución Federal, los Derechos Humanos y la Agenda Global 2030.

La conclusión a la que se llega es que, si bien existe un pluralismo técnico-legal que gravita en torno a la gestión del tracto nanotecnológico que incluye inversión, desarrollo y riesgo, la construcción de una “Ciencia Reguladora” en el país está listada para ser elaborada a partir del sandbox, cuyo propósito epistemológico es equilibrar las fuerzas políticas del juego económico, las mejores técnicas y el régimen jurídico necesario para promover el desarrollo y controlar el riesgo en los sistemas sociales y medioambientales.

Referencias

- Australian Securities and Investments Commission. (ASICs) “ASIC’s regulatory sandbox.” 21 de abril (2017). <http://download.asic.gov.au/media/4221445/john-price-speech-perth-fintech-meetup-published-21-april-2017.pdf> (Consultado: 23 de septiembre, 2020).
- Beck, Ulrich. (2011). *Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade*. 2a. ed. Traducción: Sebastião Nascimento. São Paulo: Editora 34.
- Bobbio, Norberto. (2004). *A era dos direitos*. Traducción: Carlos Nelson Coutinho. Río de Janeiro: Elsevier.
- Bobbio, Norberto. (2006). *O positivismo jurídico: lições de filosofia do Direito*. Traducción: Márcio Pugliesi, Edson Bini y Carlos E. Rodrigues. São Paulo: Ícone.
- Brasil. (2013). *Billing nº 5.133 de 2013*. <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=600333> (Consultado: 3 de agosto, 2020).
- Brasil. (2018). *Diretrizes gerais e guia orientativo para elaboração de análise de impacto regulatório – AIR (PDF)*. Casa Civil. Edição: Casa Civil. 19 de octubre. http://www.casacivil.gov.br/central-de-conteudos/downloads/diretrizes-gerais-e-guia-orientativo_final_27-09-2018.pdf/@@download/file/Diretrizes%20Gerais%20e%20Guia%20Orientativo_final_27.09.2018.pdf (Consultado: 23 de septiembre, 2019).
- Brasil. (2010). *Livro Azul: 4 Conferência Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento Sustentável. Centro de Estudos Estratégicos*. http://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/livroAzul_digital_18jan2011_6990.pdf/68c79d24-d589-42F5-ac66-4d6d728f9691?version=1.3 (Consultado: 19 de octubre, 2020).

- Brasil. (2002). Livro Branco: ciência, tecnologia e inovação. *Ministério de Ciência, Tecnologia e Informação*. http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/viewFile/887/806 (Consultado: 7 de octubre, 2020).
- Brasil. (2000). *Sociedade da Informação no Brasil: Livro Verde*. Edição: Organizado por Tadao Takahash. <http://www.socinfo.org> (Consultado: 20 de diciembre, 2020).
- Brazilian Association of the Perfumery, Cosmetics and Personal Hygiene Industry (ABIHPEC). (2019). Annual ABIHPEC: Sector Panorama of 2019. *ABIHPEC*. Editado por ABIHPEC. <http://abihpec.org.br/publicacao/panorama-do-setor-2019/> (Consultado: 7 de octubre, 2020).
- Cai, Yuzhuo. (2013). Enhancing context sensitivity of the Triple Helix model: an institutional logics perspective. *Triple Helix XI International Conference: The Triple Helix in a Context of Global change: continuing, mutating or unravelling?* 8-10 de junio. <http://www.triplehelixconference.org/th/11/bic/docs/Papers/Cai.pdf> (Consultado: 15 de noviembre, 2020).
- Engelmann, Wilson. (2018). Nanotecnologia e Direitos Humanos. *Cadernos de Direito Actual*, 9: 441-487.
- European Union (UE). (2009). *A code of conduct for responsible nanoscience and nanotechnology research*. http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/nanocode-apr09_en.pdf (Consultado: 7 de diciembre, 2020).
- Feigelson, Bruno *et al.* (2019). *Regulação 4.0*. São Paulo: Thomson Reuters.
- Feigelson, Bruno *et al.* (2018). *sandbox: o futuro da regulação*. 15 de enero. <https://www.jota.info/opiniao-e-analise/colunas/regulacao-e-novas-tecnologias/sandbox-o-futuro-da-regulacao-15012018> (Consultado: 10 de agosto, 2020).
- International Organization for Standardization (ISO). (2005). *ISO International Organization for Standardization: when the world Agrees*. <https://www.iso.org/committee/381983.html> (Consultado: 10 de enero, 2021).
- Jenik, Ivo, Lauer, Kate. (2017). Regulatory sandboxes and financial inclusion. *CGAP Working Paper*. Washington: CGAP, 1-22.
- Josanoff, Sheila. (2011). The practices of objectivity in regulatory science. *Social Knowledge in the Making*, 307-337. <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/S/bo11753188.html> (Consultado: 3 de octubre, 2021).
- Kuhn, Thomas S. (2013). *A estrutura das revoluções científicas*. Traducción: Beatriz Vianna Boeira y Nelson Boeira. São Paulo: Perspectiva.
- Lumann, Niklas. (2016). *O direito da sociedade*. Traducción: Saulo Krieger. São Paulo: Martins Fontes.
- Mello, José Luiz Homem de. (2019). Nova regra da CVM lança as bases para adoção de modelo de sandbox Regulatório no Brasil. *Cointimes*. <https://cointimes.com.br/> (Consultado: 18 de diciembre, 2020).
- Miranda, Pontes de. (1972). *Sistema de ciência positiva do direito: introdução à ciência do direito*. 2o. vol. T. II. Rio de Janeiro: Editor Borsoi.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OCDE). (2015). *Policy environments and governance for innovation and sustainable growth through nanotechnology*. 2 de febrero de 2015. [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisp/laydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO\(2013\)13/FINAL&doclangue=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisp/laydocumentpdf/?cote=DSTI/STP/NANO(2013)13/FINAL&doclangue=en)

- (Consultado: 10 de octubre, 2020).
- Ost, François. (1999). *O tempo do direito*. Traducción: Manuel Oliveira. Lisboa: Piaget.
- Pellin, Daniela. (2019). *A autorregulação regulada da Tríplice Hélice: a estruturação da boa governança em nanociência e nanotecnologia*. Latvia: Nova Edições Acadêmicas.
- Pellin, Daniela y Engelmann, Wilson. (2018). A política, a economia e o direito à efetividade do princípio da precaução: uma visão pluralista. En Aloísio Ruschinsky, Cleide Calgaro e Thadeu Weller, *Ética, direito socioambiental e democracia*, 131-146. Caxias do Sul: EducS.
- Pellin, Daniela y Engelmann, Wilson. (2017). El principio legal de precaucion en escenario de riesgo nanotecnologico. *Cadernos de Direito Actual*, 6: 09-29.
- Pellin, Daniela y Engelmann, Wilson. (2019). O Brasil e a viamão do cumprimento da Agenda 2030: as empresas, as instituições e as nanotecnologias. *Revista Culturas Jurídicas*, 6 (jan-abr): 329-359.
- Ruggiu, Daniele. (2011). Diritti umani e nanotecnologie in Europa: sul ruolo della Corte di Strasburgo. En Giorgia Guerra, Alessia Muratorio, Elena Pariotti, Mariassunta Piccini e Daniele Ruggiu, *Forme di responsabilità, regolazione e nanotecnologie*, 110-145. Bologna: Il Mulino.
- Schwab, Klaus. (2016). *A Quarta Revolução Industrial*. Traducción: Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro.
- Schwab, Klaus e Davis, Nicholas. (2018). *Aplicando a Quarta Revolução Industrial*. Tradução: Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro.
- Silva, Luiza Caldeira Leite ye Costa, Gustavo. (2019). *O sistema do sandbox regulatório como propulsor das novas tecnologias*. 9 de enero. <http://www.ab2i.org.br/o-sistema-de-sandbox-regulatorio-como-propulsor-de-novas-tecnologias-financeiras/> (Consultado: 18 de diciembre, 2020).

Autorregulación y empresas ciudadanas: cartilla de lineamientos legales para emprendedores que trabajan con nanotecnología

Self-regulation and citizen companies: the booklet on law guidelines for entrepreneurs that work with nanotechnology

Fernanda Felitti da Silva D'ávila,*[†] Daniele Weber S. Leal,* Wilson Engellman*
Raquel von Hohendorff*

ABSTRACT: Currently there is a growth in the use of nanotechnologies, within the fourth industrial revolution, providing a series of concerns in relation to ethical, legal and social aspects, as well as risks to health and the environment. Given this reality, with many risks, it has become increasingly difficult for the law and the State to follow up on the production of legislation. We seek to answer, with this article, the following research question, from a systemic-constructivist methodological perspective: is it possible to create regulatory legal scenarios based on the different legal principles existing in Brazilian law, aiming at the supervision of nanotechnologies and nanomaterials, at the light of Gunther Teubner's legal pluralism? For this, the concepts of risk were presented, based on the studies of Luhmann and Ulrich Beck, the ideas of legal pluralism of Gunther Teubner, of citizen companies and of regulated self-regulation. And at the end, an example of this solution was presented, through the *Law guidelines booklet for the industrial and commercial segment that works with nanotechnologies*. In conclusion, through regulated self-regulation it is possible to create regulatory legal scenarios, which enable legal plurality, to help in normative production, seeking to keep pace with changes in society.

KEYWORDS: nanotechnology, fourth industrial revolution, legal pluralism, regulated self-regulation.

RESUMEN: En la actualidad existe un crecimiento en el uso de las nanotecnologías, dentro de la cuarta revolución industrial, generando una serie de preocupaciones en relación con los aspectos éticos, legales y sociales, así como sobre los riesgos para la salud y el medio ambiente. Ante esta realidad de tantos riesgos, se ha vuelto cada vez más difícil para la ley y el Estado dar seguimiento a la producción de legislación. Con este artículo buscamos responder, desde una perspectiva metodológica sistémico-constructivista, la siguiente pregunta de investigación: ¿es posible crear escenarios legales regulatorios a partir de los diferentes principios legales existentes en el derecho brasileño, apuntando a la supervisión de nanotecnologías y nanomateriales, a la luz del pluralismo jurídico de Gunther Teubner? Para ello, nos basamos en los conceptos de riesgo, a partir de los estudios de Luhmann y Ulrich Beck, la idea de pluralismo jurídico de Gunther Teubner, de empresa ciudadana y de autorregulación regulada. Al final, se presenta un ejemplo de esta solución, a través de la *Cartilla de lineamientos legales para el segmento*

Recibido: 29 de mayo, 2021.

Aceptado: 27 de julio, 2021.

Publicado: 17 de septiembre, 2021.

* Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Brasil.

[†] Autora de correspondencia: fernandafelitti@gmail.com

industrial y comercial que trabaja con nanotecnologías. En conclusión, a través de la autorregulación regulada es posible crear escenarios legales regulatorios que posibiliten la pluralidad jurídica para ayudar en la producción normativa, buscando seguir el ritmo de los cambios en la sociedad.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, cuarta revolución industrial, pluralismo jurídico, autorregulación regulada.

Introducción

El uso de las nanotecnologías en el mundo está aumentando cada vez más, haciendo de esta tecnología una de las principales novedades del sector productivo. Esta ascensión de la nanotecnología, enmarcada en el contexto de la cuarta revolución industrial explicado por Klaus Schwab, plantea una serie de preocupaciones sobre aspectos éticos, legales y sociales, así como sobre los riesgos para la salud y el medio ambiente —dado que las mismas características que hacen que los nanomateriales sean diferentes y beneficiosos, también generan dudas y preocupaciones sobre su comportamiento, especialmente en cuanto a su interacción con el ecosistema—. Así, ante la existencia de varios riesgos potenciales en el uso de esta tecnología, ya sea en relación con la salud humana o con el medio ambiente, buscamos, con este artículo, dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación, desde la perspectiva metodológica sistémico-constructivista: ¿es posible crear escenarios legales regulatorios basados en los diferentes principios legales existentes en el derecho brasileño, con el objetivo de supervisar las nanotecnologías y los nanomateriales, a la luz del pluralismo jurídico de Gunther Teubner?

A partir de esta pregunta de investigación, en la primera sección de este trabajo se busca comprender el contexto de la cuarta revolución industrial en el que se inserta hoy la nanotecnología, así como analizar la cuestión de los riesgos de esta tecnología, a la luz de la teoría sociológica del riesgo de sus autores principales Niklas Luhmann y Ulrich Beck. Posteriormente, se explica la visión de Teubner sobre el pluralismo jurídico en relación con la falta de legislación compatible con el avance de la nanotecnología.

En la segunda parte del artículo se presentan los conceptos de seguridad desde el diseño (*safe by design*), RRI (*responsible research and innovation*), ELSA (*ethical, legal and social aspects*) y empresa ciudadana, que son el baluarte de una solución para la pregunta de investigación propuesta. A partir de estas herramientas podrá ser comprendida y aplicada la autorregulación regulada.

Como ejemplo de la aplicación de estas herramientas, en el último punto del artículo, se presenta la cartilla de lineamientos legales para el segmento industrial y comercial que trabaja con nanotecnología, una iniciativa del Grupo de Investigación JusNano de la Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS/Brasil), que busca contribuir a la creación de una regulación de la nanotecnología, con el uso de información de los diferentes principios legales existentes, en el derecho brasileño, a los empresarios que trabajan con nanotecnologías y nanomateriales.

En conclusión, es a través de este tipo de producción científica y normativa que se puede llegar a una solución para el problema propuesto, la autorregulación regulada, herramienta que permite regular las nuevas tecnologías en el contexto de la cuarta revolución industrial, a través del derecho, cumpliendo su rol protector de los derechos humanos, el derecho al medio ambiente y el derecho al desarrollo sostenible.

La nanotecnología, sus riesgos y la cuarta revolución industrial

La cuarta revolución industrial, es un concepto acuñado por Klaus Schwab (2016) para explicar un movimiento en marcha desde el cambio de siglo, relacionado con el impacto y las consecuencias de las innovaciones tecnológicas disruptivas como la inteligencia artificial, la robótica, la Internet, los vehículos autónomos, las impresiones en 3D, la biotecnología, el almacenamiento de energía, la computación cuántica y las nanotecnologías.

Schwab explica que lo que diferencia a la cuarta revolución industrial de las tres revoluciones tecnológicas anteriores es la velocidad, amplitud y profundidad, además de la fusión de tecnologías y la interacción entre los dominios físico, digital y biológico que ocurren (Schwab, 2016). En cuanto a la velocidad, evoluciona a un ritmo exponencial y no lineal, resultado del mundo multifacético y profundamente interconectado en el que vivimos. En relación con la amplitud y profundidad, estas se basan en la revolución digital y combinan varias tecnologías, generando un cambio de paradigma sin precedentes no solo en la economía, sino también en la sociedad y las personas.

Importante resaltar el impacto sistémico de estas tecnologías, el cual implica la transformación de sistemas enteros entre países y dentro de ellos — como en organizaciones, industrias y en toda la sociedad (Schwab, 2016)—. Es en este contexto que se insertan las nanotecnologías: conjunto de acciones de investigación, desarrollo e innovación, obtenidas gracias a las propiedades especiales de la materia organizadas a partir de estructuras de dimensiones nanométricas. El término nanotecnología deriva del prefijo griego *nános*, que significa enano, *techne* que equivale a artesanía y logos que expresa conocimiento.

Actualmente, la tecnología basada en la nanoescala trae consigo muchas incertidumbres, especialmente en lo que respecta a los riesgos altamente nocivos para la salud y el medio ambiente (Durán, Mattoso y Morais, 2006; Kühnel *et al.*, 2014; Pavlicek *et al.*, 2021). Por lo tanto, se necesita indagar sobre la forma en cómo esta tecnología presenta riesgos para la sociedad, cuáles son estos riesgos y cómo es posible enfrentarlos.

Desde la sociedad industrial hasta la actualidad, la sociedad ha adquirido diferentes denominaciones como sociedad de la información, sociedad del riesgo, posmodernidad, modernidad reflexiva, entre otras; su complejidad se ha convertido en hipercomplejidad y el exceso de posibilidades indudablemente condujo a una amplia gama de riesgos y peligros.



Los riesgos en materia de nanotecnología se encuentran en la combinación de la probabilidad de exposición y los efectos adversos que puedan generarse en este cruce. Es decir, existe la posibilidad de que surjan adversidades en la salud humana, la calidad de vida o la calidad ambiental (Hansen, Baun y Alstrup-Jensen, 2011). En la sociedad moderna, hay más seguridad y mayor riesgo, mayor grado de racionalidad y, en conjunto, mayor grado de incalculabilidad de los hechos (Rocha y Martini, 2016).

Ulrich Beck (2003) explica que el mundo de la incertidumbre no cuantificable, creado por nosotros mismos, puede expandirse mucho, siguiendo el ritmo del desarrollo tecnológico. Por lo tanto, las decisiones tomadas en el pasado, con respecto a la energía nuclear, y las actuales, como sobre la ingeniería y exploración de la ingeniería genética, la nanotecnología, la tecnología de la información, por mencionar algunas, son un detonante de consecuencias impredecibles, incontrolables e incluso incomunicables, que amenazan la vida en nuestro planeta.

Desde esta perspectiva, Beck (2010) rescata la importancia de que el conocimiento científico pueda identificar y demostrar que las consecuencias y peligros de la producción industrial desarrollada ahora serían globales, requiriendo que las políticas sean formuladas por instituciones transnacionales. Pero la perspectiva constructivista sería clave para responder a preguntas sobre cómo, por ejemplo, se produce la autoevidencia según qué riesgos son reales, y sobre qué actores, instituciones, estrategias y recursos son determinantes para su fabricación. Es decir, los riesgos existen y no son meramente una construcción social, sino que su transformación depende de cómo se perciban socialmente (Guivant, 2001).

A pesar de los posibles beneficios que trae esta nueva escala de producción, incurrimos en graves riesgos sobre sus efectos sobre el medio ambiente, entrando así en el concepto de sociedad del riesgo (Beck, 2010). Debido a esta preocupación, la difusión de la discusión sobre nanotecnología se ha desarrollado cada vez más a nivel mundial. En relación con este aspecto, se plantea la relevante teoría desenvuelta por el citado autor alemán, sociedad del riesgo, quien, al inicio de su obra *Un mundo en riesgo* (2003), cuestiona qué tienen en común hechos tan diversos como el desastre de Chernobyl, la alteración del clima, el debate sobre la manipulación genética, la crisis financiera de los países asiáticos y la amenaza actual de ataques terroristas. Enseguida, revela que cualquier discrepancia entre el lenguaje y la realidad es lo que él llama: sociedad mundial del riesgo.

El trabajo de Beck, *La sociedad del riesgo mundial: en busca de la seguridad perdida*, de 2007 (Beck, 2015), se inspiró en la obra de Luhmann, *Sociología del riesgo*. Reanudando las discusiones sobre la nueva complejidad presentada en la sociedad, con una percepción globalizada de los riesgos, derivado de las tecnologías; Beck aborda especialmente temas relacionados con daños futuros, dadas las incertidumbres existentes, recordando que las decisiones del presente se reflejarán en el futuro.

Para Luhmann (2006), la distinción entre riesgo y peligro significa que existe incertidumbre sobre los daños futuros. Se puede considerar que el potencial es consecuencia de la decisión, y entonces hablamos de riesgo y, más precisamente, del riesgo de la decisión. O se entiende que el daño potencial se produce de manera externa, es decir, se le atribuye al medio ambiente, y, en este caso, hablamos de peligro. De esta manera, el riesgo se asocia con la decisión, la expectativa, la probabilidad de que ocurran cosas en el futuro, es una comunicación dirigida al futuro.

Luhmann y Beck, dos teóricos de la sociedad del riesgo, convergen en este punto: mientras que el peligro de alguna manera proviene del exterior, el riesgo es un producto derivado, un efecto perverso o secundario (en el sentido de los efectos secundarios indeseables de los fármacos) de nuestras propias acciones.

Así, los riesgos nanométricos son descritos por Carvalho y Damascena (2013) como desastres tecnológicos, siendo parte de los desastres que resultan de la acción humana (antropogénicos). En cualquier caso, los riesgos derivados de las nanotecnologías tienen las características inherentes a la sociedad del riesgo. Se trata de riesgos invisibles, globales, trans-temporales, retardados e irreversibles, pues muestran “un gran potencial de riesgo, por tratarse de una investigación científica que desciende a niveles nunca antes alcanzados” (Engellman, Flores, Weyermüller, 2010: 125).

Por tanto, es necesario cuestionar “la propia prudencia y cautela de la ciencia en el tratamiento de las innovaciones tecnológicas y medioambientales, que, aun trayendo beneficios, están provocando riesgos sociales desmedidos” (Leite y Ayala, 2010: 114). La incertidumbre propia de la sociedad del riesgo resulta imperceptible a la percepción humana y se encuentra, en su mayor parte, en el mundo fisicoquímico, como, por ejemplo, la amenaza nuclear y los elementos tóxicos de los alimentos, conocidos solo a través de información obtenida de estudios científicos. Los riesgos inciertos son característicos del desafío de la nanotecnología, pero son una realidad más allá de la nanotecnología. Abordar la nanotecnología de manera responsable puede ayudar a aprender a lidiar con la amplia gama de riesgos para la salud, la seguridad humana y ambiental en nuestro planeta que cambia rápidamente (Dana, 2012). Sobre estos riesgos, Ost (1999, 345) menciona que la situación de incertidumbre reflexiva causada por los riesgos que son simultáneamente globales y transgeneracionales, por tanto, doblemente reflexivos, es producto de nuestras opciones tecnológicas y resultado de nuestros modelos científicos y juicios normativos, reforzando la necesidad de la revisión, basada en la epistemología de la incertidumbre y en la política de la indeterminación.

El riesgo ya no puede verse como un problema del sistema psíquico, conectado al ser humano, sino que es un problema del sistema social, de las comunicaciones de la sociedad que afectan el comportamiento de todos los grupos sociales, variando según las expectativas. Los daños derivados de las decisiones se atribuirán al riesgo; y las desviaciones que surgen del medio ambiente son peligros (Luhmann, 2006).

Como se mencionó anteriormente, en la idea de Luhmann (2006), lo que define si la situación representa riesgo o peligro es la toma de decisiones. Toda decisión genera algún tipo de riesgo, en mayor o menor grado. Todas las demás adversidades que ocurren y que no surgen de la toma de decisiones, se consideran un peligro.¹

Así, aunque hoy en día los beneficios de las nanotecnologías dominan nuestros pensamientos cuando hablamos de productos y del mercado, no se debe subestimar el potencial de esta tecnología para causar efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente, ya que, debido al tamaño de los materiales (nano), estos no se rigen por leyes de la física clásica —sino de la mecánica cuántica— abriendo posibilidades de que las nanopartículas tengan un mayor grado de toxicidad que en tamaños mayores, es por eso que existe la necesidad de evaluar los riesgos que se derivan de la manipulación, desarrollo y aplicación de estas nuevas tecnologías (Hohendorff, Engellman, 2014).

En noviembre de 2017, la OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) publicó un informe donde analiza una amplia investigación realizada desde 2015 en varios países miembros de la organización, sobre la exposición de los consumidores y el medio ambiente a los nanomateriales manufacturados, mostrando preocupación por los riesgos de estos materiales. El propósito de este informe fue proporcionar un análisis de los resultados del estudio iniciado en 2015, diseñado para recopilar información utilizada para caracterizar las exposiciones de los consumidores y el medio ambiente para la evaluación de riesgos humanos y ecológicos. La investigación estaba destinada a ser utilizada como una herramienta para informar posibles vías de acción y colaboración futuras en el área de evaluación de la exposición en relación con los nanomateriales fabricados (OECD, 2017).

Además de esta importante investigación, en la actualidad hay un aumento de publicaciones e investigaciones sobre los riesgos de las nanopartículas (Kulinowski, en: Foladori, 2015) y este conjunto de publicaciones también debe ser considerado porque representa lo que ya se conoce sobre el comportamiento de algunas partículas cuando se manipulan a escala nanométrica. Hasta 2008, el gobierno federal de Estados Unidos estaba inyectando casi US\$ 60 millones al año en investigación en el área de salud y en los impactos ambientales de la nanotecnología. En 2016, las agencias federales del país propusieron invertir US\$ 105.4 millones de dólares en estudios para comprender y abordar los riesgos potenciales de la nanotecnología para el medio ambiente y la salud. Esto representa un aumento masivo del 80%,

¹ La literatura pertinente se encuentra escrita en su inmensa mayoría en inglés. Se dispone en ella de las palabras *risk*, *hazard*, *danger*, pero estas se utilizan, en general, casi en el mismo sentido. Por supuesto, se sabe que en la percepción del riesgo y en su aceptación, la circunstancia tiene un papel importante de que uno se adentre voluntaria o involuntariamente en situaciones de peligro. Y lo mismo es válido en relación con si uno cree tener o no bajo control las consecuencias de la propia conducta” (Luhmann, 2006: 67-68).

en comparación con los ocho años anteriores, y refleja las preocupaciones actuales sobre lo que no se sabe sobre los riesgos potenciales de los materiales a nano escala diseñados y fabricados expresamente (Maynard, 2016).

Los nanomateriales, como aún tienen gran variabilidad e incertidumbre acerca de su toxicidad desafían las bases de datos, que hoy tienen datos sobre toxicidad relativamente limitados. Los materiales que pertenecen a un mismo compuesto pueden variar considerablemente con respecto a su forma, distribución de tamaño, funcionalización, modificación de superficie, agregación de estados y capacidad de disolución. Debido a esta variabilidad basada en los materiales, hoy en día la ciencia se enfrenta a vacíos de conocimiento sobre el destino y el comportamiento de los materiales de nano ingeniería en los sistemas de prueba y el medio ambiente (Gottschalk, Kost y Nowack, 2013). Por tanto, la nanotecnología y los nanomateriales tienen asociadas impredecibles consecuencias, especialmente en lo que se refiere a sus impactos negativos (Allan *et al.*, 2021), plantean un desafío a la ley (Giusti *et al.*, 2019), pues es necesario regular estas nuevas tecnologías a fin de prevenir violaciones de derechos, y aun así, seguirlas según las metas de desarrollo sostenible, propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) hasta 2030.

La autorregulación y las empresas ciudadanas

A continuación, se analizan algunas teorías y conceptos de suma importancia para comprender la propuesta de solución (de la pregunta de investigación expuesta), la autorregulación regulada.

La teoría de Ulrich Beck (2018), sobre la “metamorfosis del mundo”, aporta un foco importante en la discusión sobre los riesgos. Explicando que en relación con ellos ocurre lo que denomina “desconocimiento fabricado” (Beck, 2018, 137), justifica que nuestro conocimiento de los riesgos globales es altamente dependiente de la ciencia y de los especialistas, siendo que las industrias y especialistas son creadores y evaluadores del riesgo simultáneamente, ocupando una doble posición, y eso mina su posición de poder basada en relaciones de definición de riesgo.

Para intentar romper el círculo vicioso de la ciencia que crea riesgos, se trabajará con la perspectiva del pluralismo jurídico de Gunther Teubner y, a partir de ahí, se estructurarán las bases de la “autorregulación regulada”. Engellmann (2017) menciona que, con respecto a la integración de múltiples valores en la toma de decisiones, puede entenderse múltiple como el manejo del pluralismo jurídico a partir de las enseñanzas de Teubner. Aquí es preciso mencionar que el neomonismo precisa estar siempre en busca de normas estatales de inclusión (así como las no escritas), al paso que el pluralismo jurídico presupone la inclusión en un sistema jurídico global (que también incluye el *private ordering*). Teubner (2016, 101) entiende el pluralismo jurídico: “Como la teoría jurídica readecuada a las nuevas fuentes del derecho, llevando en cuenta, así, los procesos espontáneos de formación del derecho en la so-

ciudad mundial que se revelan independientes de las esferas estatales e interestatales”.

La teoría del pluralismo jurídico reconoce el surgimiento de normas jurídicas generadas por nuevos actores de la producción normativa. Según Teubner (Teubner, 2003), en el pluralismo jurídico la producción normativa no está exclusivamente centrada en el Estado, que deja de ser el actor privilegiado o central de la producción normativa y pasa a actuar de otras formas, por ejemplo, como mediador. Así, el pluralismo jurídico de Teubner sostiene la construcción de escenarios jurídicos (como marcos de referencia, árboles de decisión, programas de cumplimiento e integridad), organizados por variados actores de la producción normativa, diferentes a los tradicionales y con motivaciones diversas (políticas, económicas, sociales, tecnológicas), que tienen reconocimiento y eficiencia jurídica.

Cabe mencionar, además, que la decisión sobre el momento más adecuado para estructurar la regulación de los resultados de la innovación es un desafío, y enfrenta dilemas. Uno de esos dilemas fue descrito por David Collingridge, se trata del denominado “Dilema de Collingridge”, que puede ser caracterizado a partir de dos problemas opuestos: a) un problema informacional: el caso de las nanotecnologías se encuadra aquí, porque aún no existe suficiente información para estructurar un marco regulatorio; b) un problema de poder: después de que las nanotecnologías estén claramente establecidas, con información suficiente y adecuada para la regulación, habrá dificultades para establecer límites jurídico-legales. El dilema radica en el desafío de elaborar una fórmula regulatoria, que pueda traer seguridad jurídica, pero sin crear obstáculos al desarrollo de la tecnología (Collingridge, 1980).

La regulación tradicional, con la intervención legislativo-estatal, es el modo generalmente esperado por los actores participantes. Sin embargo, el conjunto de las nuevas tecnologías, donde se encuentran las nanotecnologías, acarrea características muy diferentes de las tecnologías convencionales conocidas hasta este momento. En el caso de las nanotecnologías la disrupción es notable, porque las características fisicoquímicas de las nanopartículas y de los nanomateriales hacen que los riesgos sean colocados en niveles y padrones poco conocidos en la actualidad (Nature Nanotechnology, 2019).

En este contexto entra la idea de que, a pesar de no tener una legislación que esté específicamente dirigida a nanopartículas y nanomateriales, pueden extraerse principios del conjunto del ordenamiento jurídico con carácter normativo aplicables a los variados desarrollos de las nanotecnologías, los cuales deberán dialogar con los principios y objetivos internacionales antes mencionados, formando así un cuerpo normativo a ser respetado por todos aquellos que lidian con las construcciones en nanoescala.

Así, para la conformación de este órgano regulador por entidades distintas al Estado, mediante la creación de una autorregulación regulada, es necesario que se entiendan y presenten cuatro conceptos a las empresas e industrias que trabajan con nanotecnologías y nanomateriales, que son: RRI

(*responsible research and innovation*), ELSA (*ethical, legal and social aspects*), la empresa ciudadana y la herramienta de *safe by design* (seguridad desde el diseño) como parte integrante de estos mecanismos (Soeteman-Hernández *et al.*, 2020).

Todos estos cuatro conceptos están interconectados e interactúan, convirtiéndose en un desafío exponer cada uno de ellos de forma aislada. Así, a continuación, se presentarán aspectos de todos ellos, con el fin de brindar una vista panorámica.

Hace más de veinte años se inició el Programa de Investigación de Implicaciones Éticas, Legales y Sociales (ELSI) del Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano de Estados Unidos, a partir del enfoque para los problemas éticos, legales y sociales que surgen en el contexto de la genética/genómica (Parker *et al.*, 2019). A partir de estas inquietudes, que deberían orientar la investigación en el área del genoma humano, el contenido de ELSI se extendió a otras áreas del conocimiento. La perspectiva ELSI influyó en la propuesta lanzada por la Unión Europea, años después, de la RRI, en la cual se fijó que apenas se podría considerar efectivamente una investigación e innovación responsables, si estuvieran vinculadas con las nociones de ELSI. En secuencia, surge la herramienta de *safe by design*, mostrando que la seguridad de los avances científicos debe estudiarse y diseñarse por etapas, poco a poco, dados los diferentes riesgos que podrían derivarse de la exploración humana de la nanoescala. Por tanto, una única estructura de gestión de riesgos para todas las etapas del ciclo de vida de un nanomaterial, no sería eficaz. Por el contrario, para cada etapa del ciclo de vida de un nanomaterial, deben existir estrategias específicas de gestión de riesgos.

El *safe by design* (SbD) es un concepto bien conocido en la industria. Su aplicación a los nanomateriales fue propuesta por NANoREG por primera vez. Este concepto de SbD está madurando las acciones financiadas por la UE Pro-Safe y NanoReg2, con el desarrollo de herramientas operativas para apoyar la industria y los reguladores a corto plazo (Gottardo, Huges, Jantunen 2017). El LCA (*life cycle assessment*) también es un procedimiento bien establecido, pero su aplicación a los nanomateriales se ve obstaculizada actualmente por las incertidumbres metodológicas y la falta de datos, que aún requieren un trabajo científico por resolver.

El objetivo de SbD es reducir los riesgos en una etapa inicial del proceso de innovación, utilizando el conocimiento científico actual para guiar el diseño de productos con nanomateriales. El SbD propone minimizar las propiedades peligrosas de una sustancia desde las primeras etapas de su desarrollo, de modo que cualquier problema relacionado con el riesgo se aborde en la etapa de proyecto. Además, tiene un enfoque que incorpora los aspectos de seguridad y salud ambiental en una etapa inicial del proceso de innovación de nanomateriales diseñados para garantizar la seguridad de los seres humanos y el medio ambiente (European Commission, 2017). El concepto ha sido utilizado por la industria durante algunos años y está destinado a identificar las

incertidumbres y los riesgos potenciales lo antes posible durante un proyecto de innovación, así como a identificar las medidas para reducir o eliminar estas incertidumbres y riesgos. No es un concepto independiente, sino diseñado para integrarse en los procesos de innovación actuales.

Según Engelmann (2015), SbD es considerado una herramienta de investigación e innovación responsables (RRI), preocupada con los aspectos éticos, legales y sociales (ELSA), siendo de ELSA, la idea de empresa ciudadana. RRI otorga nuevas responsabilidades, no solo a los científicos, universidades, innovadores y organizaciones, sino también a los responsables por la formulación de políticas y los financiadores de la investigación. La innovación responsable evoca un deber de cuidado colectivo que involucra, en primer lugar, repensar lo que se quiere de la innovación y, luego, cómo puede volverse viable ante la incertidumbre. Reconociendo el poder de la innovación para dar forma a nuestro futuro colectivo, RRI nos desafía, en primer lugar, a preguntarnos qué tipo de futuro queremos que traiga la innovación al mundo (Owen, Macnaghten y Stilgoe, 2012).

La estructura de RRI parece, pensando en algunos de sus puntos de vista y valores hasta ahora presentados, muy prometedora, principalmente cuando se trata de integrar más filosofía de la investigación científica. Por otro lado, la estrecha integración esperada de RRI con proyectos de investigación en curso puede presentar algunos desafíos para estudios más fundamentales de conceptos y supuestos científicos.

Siguiendo las ideas de RRI, surgen aspectos o impactos de ELSA que deben ser tomados en cuenta a la hora de realizar una investigación científica. Una vez más, se busca no bloquear el desarrollo, sino pensar con más seguridad, evitando mayores riesgos, especialmente en lo que respecta a la investigación genómica y nanotecnológica. En la última década se han invertido alrededor de 20 millones de euros en programas de esta categoría. La creación de ELSA ha generado numerosas críticas por centrarse especialmente en aspectos de efectos y resultados (ELSA, 2017; Simeone *et al.*, 2019; Hohendorff, 2018).

Sin embargo, un componente importante del desarrollo responsable de la nanotecnología es la consideración de sus posibles implicaciones éticas, legales y sociales. Para lo cual es útil preguntarse: ¿cómo se introducen en la sociedad la investigación y las aplicaciones de la nanotecnología?, ¿cuán transparentes son las decisiones?, ¿cómo se necesitan políticas sensibles y receptivas y también las percepciones de toda la gama de partes interesadas?, y, ¿cómo se abordarán las cuestiones éticas, legales y sociales para determinar la confianza pública y el futuro de la innovación impulsada por la nanotecnología?

El concepto ELSA se enfoca principalmente en los diversos impactos generados por la ciencia en la sociedad, mientras que la estructura de la RRI sirve para poner mayor énfasis en el proceso de investigación e innovación, apuntando a una mayor implicación y reflexividad —al mismo tiempo que enfatiza la apertura, la transparencia y el diálogo.

Siguiendo con el concepto ELSA, Hullmann (2008) señala que en nanotecnología, los aspectos éticos, legales y sociales ofrecen una visión importante para el público interesado, ayudando a identificar expectativas e inquietudes y, al mismo tiempo, es importante para la toma de decisiones en las políticas públicas, al corresponder a las necesidades en términos de buena gobernanza de la investigación, incluida la gestión de riesgos. Tales disposiciones de política se enfrentan al desafío de priorizar la investigación financiada con fondos públicos, así como de decidir el futuro de las regulaciones. En este sentido, también destaca que, para dar respuesta a las inquietudes de la sociedad, es fundamental entablar un diálogo sobre los beneficios y riesgos de la nanotecnología, involucrando a gran parte del público y basado en juicio informado.

ELSA, en nanotecnología, comprende una amplia gama de temas relacionados con la investigación, producción y uso de nanotecnología y productos habilitados por ella. Abarcan temas de privacidad, aceptación, salud humana, acceso, responsabilidad, regulación y control, haciendo claramente imprescindible la participación del público consumidor y de la población en general.

La Iniciativa Nacional de Nanotecnología de los Estados Unidos de América (NNI-2017) tiene el compromiso de promover el desarrollo de una comunidad de expertos en temas de ELSA, relacionados con la nanotecnología y construir colaboraciones con diferentes actores, consumidores, ingenieros, filósofos, fabricantes, organizaciones no gubernamentales, reguladores y científicos. Estos grupos de partes interesadas consideran los posibles beneficios y riesgos de los hallazgos en el campo y brindan sus perspectivas sobre las nuevas pautas de investigación. Con las partes interesadas de la industria, la NNI también desarrolla recursos de información para cuestiones éticas y legales relacionadas con la propiedad intelectual y las implicaciones éticas de las patentes basadas en la nanotecnología y los secretos comerciales. Para aumentar la conciencia y la educación de las partes interesadas sobre los temas de ELSA, es necesario difundir el conocimiento apropiado y relevante de estos aspectos a varios actores con diferentes niveles de conocimiento; así, el marco de oportunidades será expandido y nuevos enfoques para las interacciones deliberativas entre grupos de *stakeholders* (grupos de interés), que son numerosos y diversos, serán desarrollados e implementados. (NNI, 2021).

Actualmente, NNI tiene el centro más grande del mundo con enfoque en los aspectos sociales de la nanotecnología: el Centro para la Nanotecnología en la Sociedad, de la Universidad Estatal de Arizona (ASU, 2021). Una forma de aplicación práctica de los elementos de ELSA se puede encontrar en la concepción renovada de empresa ciudadana, donde la empresa ya no se entiende solo orientada a la obtención de lucro, sino como un grupo humano, que se propone satisfacer las necesidades humanas con calidad (Engellman, 2017).

Como concepto de empresa ciudadana, se puede entender aquella que al actuar asume responsabilidades y no descuida el entorno social o ecológico, limitándose a buscar el máximo beneficio material posible. Y es precisamente este tipo de organización la que actúa inteligentemente porque, com-

portándose con esta simpatía hacia su entorno, establece una cultura de confianza entre sus integrantes (Cortina, 2005).

Sen (2010: 336) explica que “un código básico de buena conducta en los negocios es un poco como el oxígeno: empezamos a interesarnos por su presencia cuando no está presente”. Teubner (2016, 178) menciona que “las instancias estatales, como las expectativas normativas, los movimientos sociales y las organizaciones de la sociedad civil, brindan impulsos constitucionales de aprendizaje para la orientación ecológica de las empresas.”

Se verifica, también, la referencia a este código de buena conducta, en la *Recomendación de la Comisión al Parlamento Europeo* del 7 de febrero de 2008, que trae la idea de un código de conducta para una investigación responsable en el campo de las nanociencias y las nanotecnologías (2008/345/CE).

Esta nueva organización, preocupada por los aspectos éticos, legales y sociales, será fundamental para el desarrollo de una investigación e innovación responsable en el caso de las nanotecnologías, enfocadas en la sostenibilidad en todas sus dimensiones. Como características de esta nueva organización ciudadana, Cortina y Navarro (2015: 167) presentan:

1. *Responsabilidad por el futuro* La necesidad de una gestión a largo plazo obliga a conciliar el beneficio y el tiempo.
2. Desarrollo de habilidades *de comunicación*. Toda organización necesita una legitimación social, que se “vende” comunicativamente. El respeto a las normas morales también es un imperativo de las relaciones públicas, ya que es necesario crear un *entorno afectivo*.
3. *Personalización e identificación* de personas y empresas. El fracaso del individualismo hace necesario insertar a los individuos en grupos y desarrollar el sentido de *pertenencia* a ellos. En la competencia entre empresas, los anuncios comerciales no son suficientes para identificar la personalidad de una empresa, sino que se impone el imperativo de la personalización de las empresas. Un claro ejemplo de ello es el patrocinio, que no se ejerce sin ánimo de lucro.
4. En una cultura de *comunicación* la moral impulsa la creatividad de los especialistas en comunicación y funciona como un medio de diferenciación y personalización de la empresa. En una empresa abierta, la ética es parte del *management* de ‘*tercer tipo*’, basándose en la complejidad de los mercados, no solo el principio de innovación permanente de los productos, sino en la innovación ‘moral’ de la comunicación.
5. *Confianza*² Las imágenes de eficiencias han sido remplazadas por las de confianza entre la empresa y el público. Por ejemplo, en la imagen

² Sobre la confianza, Luhmann explica que “donde hay confianza hay aumento de posibilidades para la experiencia y la acción, hay un aumento de la complejidad del sistema social y también del número de posibilidades que pueden reconciliarse con su estructura, porque la confianza constituye una forma más efectiva de reducción de la complejidad” (Luhmann, 1996: 14).

de responsabilidad social y ecológica de la empresa con la que se busca establecer un vínculo entre la empresa y el público (énfasis añadido por el autor).

Varias de las características de esta nueva organización están ligadas con la idea de la herramienta SbD, a través de la cual se puede dar el puente que favorecerá la comunicación entre ciencia (productora de innovación) y el derecho. La propia idea de una cultura de la comunicación también se puede ver en la herramienta SdB, así como la innovación moral de la comunicación, y de esta manera, SbD sería una forma de potenciar el resultado de la comunicación entre diferentes sistemas, como ciencia, derecho, economía, e, incluso, política.

Sobre la confianza, Luhmann (1996, 196) señala que una concepción muy compleja y estructurada del mundo no podría establecerse sin una sociedad definitivamente compleja, que, a su vez, no se puede establecer sin confianza —porque la confianza reduce la complejidad social. La confianza es dependiente de los otros mecanismos de reducción, desarrollados paralelamente con esta, por ejemplo, los de la ley, de la organización y, por supuesto, los del lenguaje. Sin embargo, no puede reducirse a ellos.

Los aspectos de responsabilidad social y ambiental de la organización también pasan por la idea de *safe* en el sentido de colocar un producto más seguro en el mercado. El cuidado con el medio ambiente y con los seres humanos, mediante la adopción de enfoques preventivos y de gestión de riesgos, se puede percibir en la forma en que las organizaciones se comportan con sus consumidores y en la comunidad en la que operan. Las organizaciones exitosas deben tener una visión integral de la gestión de riesgos, que puede considerar cómo protegerse en términos de algunos riesgos, qué riesgos deben explorarse y cómo explotarlos (Damodaran, 2009).

La ética organizacional tiene un papel directo e indirecto en la construcción del desarrollo económico y sus influencias abarcan una amplia variedad de temas, entre ellos, la protección del medio ambiente y la sostenibilidad, el fortalecimiento de los derechos humanos juntamente con el propósito de eliminar la pobreza (Sen, 2007). Castells (en: Cortina, 2007) contribuye al debate sobre la ética organizacional al exponer que las organizaciones también discuten la aplicación de la conciencia ecológica en el proceso empresarial, pasando por todo el proceso de producción.

Este es un problema de conciencia, no de dificultad técnica. Y en ese sentido, es en última instancia una cuestión ética. Antonik (2016, 214) explica que la responsabilidad social y ambiental en el área de negocios, es la responsabilidad de la organización con la sociedad y el medio ambiente, además de sus compromisos legales (*compliance*) y económico-financieros.

Según lo expuesto por Teubner (2016, 175) esto significa una “ecologización” de la constitución empresarial, forzada externamente —por parlamentos, gobiernos, sindicatos, movimientos sociales, organizaciones no gubernamen-

tales, profesiones y medios de comunicación— a cambiar la estructura interna de las empresas, algo que limite las compulsiones de crecimiento excesivo y daño al ambiente. Una constitución corporativa, en este sentido, requeriría que la política corporativa tenga en cuenta las necesidades de su entorno, la naturaleza, la sociedad y los seres humanos, y acompañada de implementaciones internas y control externo.

Así, la responsabilidad social de las organizaciones es, al mismo tiempo, un mejor negocio para la empresa y, además, ayuda en la creación de un mundo mejor y más sostenible, preocupado por la aplicación práctica de los conceptos de RRI y ELSA. Pero, no todo es tan simple y fácil de implementar, especialmente en un mundo donde este no es el concepto de organización que predomina. Así, la idea de organización ciudadana tropieza con innumerables dificultades que obstaculizan su realización.

De esta forma, siendo el objetivo principal una preocupación con la evolución sostenible, la investigación, innovación responsable y con los aspectos éticos, legales y sociales, surge la necesidad de cambios para este modelo de organización ciudadana. Se trata de cambios estructurales que llevan de la jerarquía a la corresponsabilidad, un cambio en la cultura organizacional, la reconfiguración ética del mundo del trabajo, como requisito para hacer frente a los riesgos inciertos y desconocidos que pueden traer las nanotecnologías (Engellman, 2017) y el reposicionamiento del equilibrio social, que no solo representa el equilibrio económico de la organización, sino “también datos sobre el grado de satisfacción que está generando una empresa en la sociedad en la que desarrolla su actividad” (Cortina, 2005: 85-86).

Según Catalán (2008: 92), debido al principio de desarrollo sostenible, las relaciones económicas de una sociedad deberán presentar un comportamiento eco-social, y sus actividades empresariales “necesitan ser administrados como en las civilizaciones helénicas, sin gastar más de lo que ganan, ni retirarse de la naturaleza más de lo que puede ser remplazado”. De estos conceptos, han sido propuestas innumerables soluciones para la regulación de las nanotecnologías, que incluyen abordajes voluntarios, cooperativos o en asociación. Pero, a pesar de las grandes ventajas de cada una de ellas, ninguna de las soluciones propuestas para regular las nanotecnologías, hasta el momento, consiguió contemplar dos requisitos importantes: a) la amplia participación de la industria, con la presentación de datos suficientes para auxiliar a los reguladores en relación con la evaluación de riesgos, y, b) las garantías sobre el papel del gobierno en la regulación de tecnologías emergentes que consideren el interés público (ciudadanos) (Abbot, Marchant y Sylvester, 2010; Shandilya *et al.*, 2020; Soeteman-Hernández *et al.*, 2021).

De este modo, es imprescindible la construcción de un nuevo modelo regulatorio, reconocido por el Estado, donde se pueda incluir como característica la efectiva actuación sobre los posibles riesgos ambientales. Siendo necesaria la formulación de políticas públicas e instrumentos de participación de la iniciativa privada, como organizaciones internacionales, agencias regulatorias y

ONGs, que entiendan la realidad de la crisis ambiental y busquen el enfrentamiento para contemplar la urgente coevolución entre los sistemas de economía y de derecho. Esa coevolución sistémica es posible con la producción de directrices y normas que incorporen en sus formulaciones la necesidad primordial de adaptación de la actuación estatal a la nueva realidad (Weyermüller, 2014).

En el siguiente apartado de este artículo se presenta un ejemplo de producción científica que busca contribuir a la construcción de la denominada autorregulación regulada y brindar orientación a los emprendedores que buscan convertir su empresa o industria en una empresa ciudadana, cumpliendo con los lineamientos que propone este concepto: *Cartilla de lineamientos jurídicos para el segmento industrial y comercial que trabaja con nanotecnología*, que presenta principios rectores del derecho a los empresarios, cumpliendo el rol de informarles de la existencia de estos, incluso si no existe una legislación que cubra el tema.

Cartilla de lineamientos legales para el segmento industrial y comercial que trabaja con nanotecnología y la autorregulación regulada

Como se mencionó anteriormente, la nanotecnología trae grandes transformaciones y desafíos a la vida cotidiana, incluidos aquellos que hacen uso de la nanotecnología y los nanomateriales en sus industrias. Por ello, el Grupo de Investigación JusNano, dirigido por el Prof. Dr. Wilson Engelmann, presente en la Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) desde 2008, vinculado con el Programa de Posgrado en Derecho (maestría y doctorado) y al Máster Profesional en Derecho de Empresas y Negocios, en el que desarrollan investigaciones relacionadas con los desafíos que enfrenta el derecho debido a la nanotecnología, buscó dar respuesta a las preguntas que surgieron en el entorno empresarial relacionadas con la nanotecnología: ¿cómo avanzar con esa innovación sin retroceder en la protección humana y ambiental?, ¿cómo gestionar una empresa, amparada por la ley, si no existe una legislación específica para las tecnologías “nano”? Así, se elaboró la *Cartilla de lineamientos legales para el segmento industrial y comercial que trabaja con nanotecnología* con el objetivo de brindar información a los emprendedores, para que crezcan junto con el derecho (Leal, Martins, Hohendorff, Engellman, 2020).

La Cartilla fue el resultado de un amplio y largo trabajo de investigación, con la ayuda de la Fundación para el Apoyo a la Investigación en el Estado de Rio Grande do Sul (FAPERGS) y contiene los principios presentes en nuestra Constitución Federal Brasileña, bien como en las normas técnicas ISO, que puede garantizar la seguridad de la gestión empresarial y del ecosistema, al mismo tiempo que se ocupa de la nanotecnología. Así, es posible mejorar el desarrollo empresarial, ya que los avances y límites serán claros, bajo la guía del derecho y, en consecuencia, habrá protección de los seres vivos y el medio ambiente.

Se pretende que la Cartilla sea una guía regulatoria para las actividades industriales y comerciales relacionadas con las nanotecnologías ante la falta de una legislación específica. La observación de los principios explicados en la Cartilla puede ayudar en el desarrollo de las nanotecnologías en Brasil, permitiendo una operación más segura y en línea con la ley brasileña (Leal, Martins, Hohendorff, Engellman, 2020).

Estos principios son:

1. Principio de prevención y precaución: el primero busca evitar riesgos al medio ambiente y al ser humano, mediante la adopción de diferentes medidas. Y el segundo garantiza la protección frente a posibles riesgos que aún no se pueden identificar, debido al precario estado de los conocimientos. Legislación brasileña relacionada con estos principios: Constitución Federal de Brasil (CF). Art. 200, I a VII; 225; caput e incisos IV y V; art. 1, Ley 11.105/2005 (Bioseguridad). Objetivo de la República Federativa del Brasil: promover el bien de todos (CF). Art. 3, iv; Seguridad (CF). Arts. 5, caput y 6, caput; CF. Art. 218, § 2. Política Nacional de Medio Ambiente (Ley 6.368/1981). Política Nacional de Residuos Sólidos (Ley 12.305/2010). Art. 3, X y XI. Gerenciamiento y Gestión Integrada de Residuos Sólidos.
2. Principio de no regresión ambiental: busca el respeto al derecho fundamental al disfrute de un medio ambiente ecológicamente equilibrado para las generaciones presentes y futuras. Legislación brasileña relacionada con este principio: Prevalencia de los Derechos Humanos y de los Tratados Internacionales (CF). Art. 5, § 2 y 3; Art. 4, II; 170, VI; 200, VIII, 225; Política Nacional de los Residuos Sólidos. El destino y disposición final debe ser ambientalmente adecuado (Ley 12.305/2010, Art. 3, VII y VIII); Padrones sostenibles de consumo (Ley 12.305/2010, art. 3, XIII).
3. Principio de transparencia: busca el respeto al derecho de acceso de los ciudadanos, especialmente en su situación de consumidor, a toda la información sobre situaciones que les afectan directamente, especialmente en lo que respecta a su salud y seguridad relacionada también con los productos y servicios que consumen diariamente. Legislación brasileña relacionada con este principio: Derecho/deber de información. Art. 5, XIV, CF. Principio de publicidad administrativa y ambiental (CF). Art. 37, caput y Art. 225, VI. Competencia común de la Unión, Estados y Municipios en proteger el medio ambiente y combatir la contaminación en cualquiera de sus formas (CF). Art. 23, VI. Código de Defensa del Consumidor. Arts. 4, IV; 6, II; 9.
4. Principio de participación del público: está ligado al principio de transparencia, ya que para promover uno se debe promover el otro, buscando respetar el derecho del público a participar en todas las decisiones que involucren la nanotecnología, ya que pueden afectarla

directamente. Legislación brasileña relacionada con este principio: la misma base descrita en el principio anterior.

5. Principio de la responsabilidad del productor: busca garantizar la existencia de responsables, sean ellos los desarrolladores, los operadores, los fabricantes y/o los vendedores de nanoproductos, por la prevención y la remediación de eventuales daños causados por las nanotecnologías, al ser humano o al medio ambiente. No hay legislación específica en Brasil referente a la responsabilidad del productor con la nanotecnología, pero la legislación relacionada con este principio en otras esferas: Código Civil (responsabilidad por el riesgo del desarrollo). Art. 931; Principio del contaminador pagador; Crímenes Ambientales. Ley 9.605/1998; Art. 225, § 3. Política Nacional de Residuos Sólidos. Art. 3, XVII. Responsabilidad compartida entre fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, ciudadanos, et- cetera.
6. Principio de protección y salud de la población y de los trabajadores: busca la prevención inmediata de exposiciones efectivas o probables durante el proceso de producción o respecto a residuos destinados a disposición o reciclaje, en relación con nanomateriales que presentan riesgos, o incluso aquellos en los que no exista seguridad comprobada. Legislación relacionada con este principio: Defensa del Trabajador (CF). Art. 1, III y IV (dignidad humana; valor social del trabajo y de la libre iniciativa). Defensa del Consumidor (CF). Art. 5, XXXII y 170, V; Arts. 8 hasta 24, Código de Defensa del Consumidor (CDC). Cobertura del riesgo y protección al accidente de trabajo (CF), Art. 7, XXII y Art. 201, § 10. Protección del riesgo a toda la sociedad (CF). Art. 225, § 1, V; art. 170, V. Derecho a la salud (CF). Art. 196.

Por lo tanto, los diferentes medios de producción normativa (estatal y no estatal) no son excluyentes uno del otro, pero merecen pesos distintos una vez que la producción no estatal, bajo el signo de la globalización, puede no ser totalmente compatible con los medios tradicionales de producción normativa (Teubner, 2003: 11).

Respecto a las nanotecnologías y sus riesgos, existe un déficit legislativo que, según Engellmann (2012, 321) hace oportuno, principalmente en la estructura normativa del derecho consolidada a partir de Hans Kelsen, que otros actores de producción jurídica y fuentes de derecho que hasta entonces siempre estuvieran a la sombra del texto de la ley, participen del proceso legislativo. Una de las soluciones para este déficit es la autorregulación regulada, siendo que, para mitigar los efectos negativos sobre la autorregulación, se propone que sea regulada por la participación del Estado, especialmente a partir de una fiscalización del cumplimiento de la parte externa a las organizaciones, que se relaciona con los derechos humanos expresados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Objetivos de Desarrollo del Milenio de la

ONU. Por tanto, aunque se hable de autorregulación, existirá un elemento externo con posibilidad de constreñir, y con alguna penalidad para el caso de incumplimiento.

Una alternativa para enfrentar de manera cualitativa los desafíos que aún persisten sobre la autorregulación de los nanomateriales es recurrir a una guía para la gobernanza del riesgo basada en tres niveles (Rodríguez, 2018): 1. Herramientas avanzadas que faciliten la toma de decisiones con base en el riesgo, incluyendo una evaluación de las necesidades de los usuarios en relación con la evaluación, la mitigación y la transferencia de riesgos. 2. Un modelo integrado de comportamiento humano orientado a la toma de decisión sobre riesgos de los nanomateriales. 3. Requisitos jurídico-legales y otros (nanoespecíficos y generales) para garantizar el acuerdo y estimular abordajes proactivos de seguridad. La implementación de tal abordaje deberá facilitar y motivar las buenas prácticas para las partes interesadas, de modo que permita el desarrollo futuro seguro y sostenible de las nanotecnologías (Stone 2018).

Consideraciones finales

Se puede entender que los cambios y disrupciones provocados por las nuevas tecnologías, en particular la nanotecnología, enmarcados en el contexto de la cuarta revolución industrial, traen grandes desafíos a los distintos sistemas, siendo el derecho muy afectado para mantener su papel dentro de la sociedad para garantizar los derechos. Sin embargo, encuentra obstáculos en el contexto de un crecimiento exponencial y muy rápido de las nuevas tecnologías, haciéndose cada vez más complejo el acompañar estos cambios sociales.

Siendo que el riesgo de las nanotecnologías puede traer consigo importantes violaciones a los derechos humanos y derechos ambientales, especialmente con la falta de legislación en la materia, en este escenario de riesgo como explican Beck y Luhmann, es necesario algún tipo de norma o regulación, y esta no necesariamente debe provenir del Estado, del poder legislativo —lo cual se explica en la teoría del pluralismo jurídico de Teubner, y de cómo es posible crear el derecho a partir de diferentes fuentes, destacando las reglas necesarias para seguir los avances que se dieron con la cuarta revolución industrial.

Por tanto, es a partir de los conceptos y relaciones que se dan entre SbD, RRI, ELSA y empresa ciudadana, que se puede presentar una solución a la pregunta de investigación propuesta, y es a través de estas herramientas que se puede entender y aplicar la autorregulación regulada.

Como ejemplo de la aplicación de esta solución, se presentó la *Cartilla de lineamientos legales para el segmento industrial y comercial que trabaja con nanotecnología*, iniciativa del Grupo de Investigación JusNano. Con esto, se buscó contribuir para la creación de un reglamento de nanotecnología, presentando la posibilidad de la pluralidad jurídica, de modo que las fuentes del derecho,

en esta cuarta revolución industrial, no solo estén vinculadas con la legislación producida por el Estado, lo cual es una forma anticuada de abordar las tecnologías disruptivas, puesto que no se consiguen acompañar los cambios de la sociedad y cumplir su papel de manera integral, que debe ser el de proteger los derechos humanos, el derecho al medio ambiente y el derecho al desarrollo sostenible.

Referencias

- Abbot, K. W., Marchant, G. E., Sylvester, D. J. (2010). Transnational regulation of nanotechnology: reality or romanticism? En G. A. Hodge, D. M. Bowman, A. D. Maynard (eds.), *International handbook on regulating nanotechnology*. Cheltenham: Edward Elgar.
- Allan, J. et al. (2021). Regulatory landscape of nanotechnology and nanoplastics from a global perspective. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 122(104885). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273230021000258>
- Antonik, L. R. (2016). *Compliance, ética, responsabilidade social e empresarial: uma visão prática*. Rio de Janeiro: Alta Books.
- ASU. Arizona State (2021). *University. The Center for Nanotechnology in Society*. (2021). <http://cns.asu.edu>
- Beck, U. (2003). *Un mondo a rischio*. Traducción de Laura Castoldi. Torino: Giulio Einaudi.
- Beck, U. (2010). *Sociedade de risco: rumo a uma outra modernidade*. Traducción de Sebastião Nascimento. São Paulo: Ed. 34.
- Beck, U. (2015). *Sociedade de risco mundial: em busca da segurança perdida*. Traducción de Marian Toldy y Teresa Toldy. 1a ed. Lisboa: Edições 70, 2015. Documento disponible para Kindle.
- Beck, U. (2018). A metamorfose do mundo: novos conceitos para uma nova realidade. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, 9(3), São Paulo. <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v9i3.24815>
- Carvalho, D. W. de, Damacena, F. D. L. (2013). *Direito dos desastres*. Porto Alegre: Livraria do Advogado.
- Castells, M. (2007). Para além da caridade: responsabilidade social no interesse da empresa na nova economia. En Cortina, Adela (org.). *Construir confiança: ética da empresa na sociedade da informação e das comunicações*. Traducción de Alda da Anunciação Machado. São Paulo: Edições Loyola.
- Catalan, M. J. (2008). *Proteção constitucional do meio ambiente e seus mecanismos de tutela*. São Paulo: Método.
- Collingridge, D. (1980). *The social control of technology*. Nueva York: St. Martin's.
- Cortina, A. (2005). *Cidadãos do mundo: para uma teoria da cidadania*. Traducción de Silvana Cobucci Leite. São Paulo: Loyla.
- Cortina, A., Navarro, E. M. (2015). *Ética*. São Paulo: Edições Loyola.
- Damodaran, A. (2009). *Gestão estratégica do risco: uma referência para a tomada de riscos empresariais*. Porto Alegre: Bookman.

- Dana, D. A. (2012). *The nanotechnology challenge: creating legal institutions for uncertain risks*. Nueva York: Ed. Cambridge University Press.
- Durán, N., Mattoso, L. H. C., Morais, P. C. de. (2006). *Nanotecnologia: introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação*. São Paulo: Artliber.
- ELSA. (2017). What is ELSA research – in a Norwegian context? <https://www.ntnu.no/blogger/elsa/whatiselsanorway/what-is-elsa-research-in-a-norwegian-context>
- Engelmann, W. (2012). O diálogo entre as fontes do direito e a gestão do risco empresarial gerado pelas nanotecnologias: construindo as bases à juridicização do risco. En L. L. Streck; L. S. Rocha, W. Engelmann. (orgs.). *Constituição, sistemas sociais e hermenêutica: anuário do Programa de Pós-Graduação em Direito da unisinos: mestrado e doutorado: no. 9*. Porto Alegre-São Leopoldo: Livraria do Advogado/Unisinos.
- Engelmann, W. (2015). As nanotecnologias como um exemplo de inovação e os reflexos jurídicos no cenário da pesquisa e inovação responsáveis (responsible research and innovation) e das implicações éticas, legais e sociais (ethical, legal and social implications). En Streck, L. L., Rocha, L. S., Engelmann, W. (org.). *Constituição, sistemas sociais e hermenêutica: anuário do Programa de Pós-Graduação em Direito da UNISINOS: mestrado e doutorado: n. 12*. Porto Alegre: Livraria do Advogado; São Leopoldo: Ed. Unisinos.
- Engelmann, W. (2017). O pluralismo das fontes do direito como uma alternativa para a estruturação jurídica dos avanços gerados a partir da escala manométrica. En Streck, L. L., Rocha, L. S., Engelmann, W. (org.). *Constituição, sistemas sociais e hermenêutica: anuário do Programa de Pós-Graduação em Direito da UNISINOS: mestrado e doutorado: n. 13*. Porto Alegre: Livraria do Advogado; São Leopoldo: Ed. Unisinos.
- Engelmann, W., Flores, A. S., Weyermüller, A. R. (2010). *Nanotecnologias, marcos regulatórios e direito ambiental. 1. ed*. Curitiba: Honoris Causa.
- European Commission. (2017). *Science for environment policy. Assessing the environmental safety of manufactured nanomaterials: in-depth report 14*. Bristol. http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/assessing_environmental_safety_nanomaterials_IR14_en.pdf
- Foladori, Guillermo et al. 2015. *Nanotecnologías en América Latina: trabajo y regulación*. Zacatecas, México: Ed. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Giusti, A. et al. (2019). Nanomaterial grouping: existing approaches and future recommendations. *NanoImpact*, 16(100182). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452074819300916>
- Gottardo, S., Huges, C., Jantunen, P. (ed.). (2017). *NANoREG framework for the safety assessment of nanomaterials*. JRC Science for Policy Report, Brussels. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC105651/kjna28550enn.pdf>
- Gottschalk, Fadri; Kost, Elias; Nowack, Bernd. (2013). Engineered nanomaterials in water and soils: a risk quantification based on probabilistic exposure and effect modeling. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 32, no. 6: 1278-1287.

- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23418073>
- Guivant, J. S. (2001). A teoria da sociedade de risco de Ulrich Beck: entre o diagnóstico e a profecia. *Estudos Sociedade e Agricultura*, 16, abr. Rio de Janeiro. <http://r1.ufrj.br/esa/V2/ojs/index.php/esa/article/download/188/184>
- Hansen, S. F., Baun, A., Alstrup-Jensen, K. (2011). *NanoRiskCat – A conceptual decision support tool for nanomaterials*. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, (Environmental project, n. 1372). <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/12/978-87-92779-11-3.pdf>
- Hohendorff, R. v., Engelmann, W. (2014). *Nanotecnologias aplicadas aos agroquímicos no Brasil: a gestão do risco a partir do diálogo entre as fontes do direito*. Curitiba: Juruá.
- Hohendorff, R. v. (2018). *A contribuição do safe by design na estruturação autorregulatória da gestão dos riscos nanotecnológicos: lidando com a improbabilidade da comunicação inter-sistêmica entre o direito e a ciência em busca de mecanismos para concretar os objetivos de sustentabilidade do milênio*. Tesis de doctorado. Programa de Pós-Graduação em Direito Público. 480 p. <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/7055>
- Hullmann, A. (2008). *European activities in the field of ethical, legal and social aspects (ELSA) and governance of nanotechnology*. Nano and Converging Sciences and Technologies, Luxembourg, oct. http://cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/elsa_governance_nano.pdf
- Kühnel, D. et al. (2014). Environmental impacts of nanomaterials: providing comprehensive information on exposure, transport and ecotoxicity – the project DaNa2.0. *Environmental Sciences Europe*, 26(21). <http://www.enveurope.com/content/26/1/21>
- Leal, D. W., Martins, P. S., Hohendorff, R. v.; Engelmann, W. (2020). *Orientações Jurídicas para o Segmento Industrial e Comercial que Trabalha com Nanotecnologias: construindo estruturas normativas a partir dos princípios*. São Leopoldo: Karywa.
- Leite, J. R. M., Ayala, P. de A. (2010). *Dano ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial. Teoria e prática. 3. ed. rev., atual. e ampl.* São Paulo: Revista dos Tribunais.
- Luhmann, N. (1996). *Confianza. Introducción de Darío Rodríguez Mansilla*. Barcelona: Anthropos; México: Ed. Universidad Iberoamericana; Santiago do Chile: Instituto de Sociología; Ed. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Luhmann, N. (2006). *Sociología del riesgo*. Tradução de Silvia Pappé, Brunhilde Erker e Luis Felipe Segura. México: Ed. Universidad Iberoamericana.
- Maynard, A. (2016). Não falamos mais sobre riscos da nanotecnologia, mas isso não significa que eles desapareceram. *Tecnologias Emergentes, Sociedade e Desenvolvimento*, <http://nanotecnologiasociedade.weebly.com/blog/nao-falamos-mais-sobre-riscos-da-nanotecnologia-mas-isso-nao-significa-que-desapareceram-por-andrew-maynard>
- Nature Nanotechnology. n. d. *Nanomaterials Definition Matters*. (Consultado em 2019). www.nature.com/naturenanotechnology
- National Nanotechnology Initiative (NNI). (2021). *Ethical, legal and societal issues*.

- <http://www.nano.gov/you/ethical-legal-issues>
- Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). (2017). *Consumer and environmental exposure to manufactured nanomaterials. Information used to characterize exposures: analysis of a survey*. (Series on the safety of manufactured nanomaterials, n. 84). Paris: ENV/JM/MONO.
- Ost, F. (1999). *O tempo do direito*. Traducción de Maria Fernanda Oliveira. Lisboa: Instituto Piaget.
- Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J. (2012). Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society. *Science and Public Policy*, 39(6), dec. Londres. <https://academic.oup.com/spp/article/39/6/751/1620724>
- Parker, L. S. et al. (2019). Normative and conceptual ELSI research: what it is, and why it's important. *Genetics in medicine. Official Journal of the American College of Medical Genetics*, 21(2). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29970926/>
- Pavlicek, A. et al. (2021). A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. *NanoImpact*, 21(100276). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074820300707>
- Rocha, L. S., MartinI, S. R. (2016). *Teoria e prática dos sistemas sociais e direito*. Porto Alegre: Livraria do Advogado.
- Rodríguez, H. (2018). Nanotechnology and risk governance in the European Union: the constitution of safety in highly promoted and contested innovation areas. *NanoEthics* 12(1).
- Schwab, K. (2016). *A quarta revolução industrial*. Traducción de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro.
- Sen, A. (2010). *Desenvolvimento como liberdade*. Traducción de Laura Teixeira Motta. São Paulo: Companhia das Letras.
- Sen, A. (2007). Ética de empresa e desenvolvimento econômico. En Cortina, A. (org.), *Construir confiança: ética da empresa na sociedade da informação e das comunicações*. São Paulo: Edições Loyola.
- Shandilya, N. et al. (2020). Perspective on a risk-based roadmap towards the implementation of the safe innovation approach for industry. *NanoImpact*, 20(100258). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452074820300525>
- Simeone, F. C., Blosi, M., Orтели, S., Costa, A. L. (2019). Assessing occupational risk in designs of production processes of nano-materials. *NanoImpact*, 14(100149). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074818301794>
- Soeteman-Hernández, L. G. et al. (2020). Challenges of implementing nano-specific safety and safe-by-design principles in academia. *NanoImpact*, 19(100243). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074820300379>
- Soeteman-Hernández, L. G. et al. (2021). Modernizing innovation governance to meet policy ambitions through trusted environments. *NanoImpact*, 21(100301). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452074821000100>
- Stone, V. et al. (2018). The essential elements of a risk governance framework for current and future nanotechnologies. *Risk Analysis*, 38(7).
- Teubner, G. (2003). *A Bukowina global sobre a emergência de um pluralismo jurídico transna-*

cional.<http://livrozilla.com/doc/1623775/a-bukowina-global-sobre-a-emerg%C3%Aancia-deum-pluralismo>

- Teubner, G. (2016). *Fragments constitucionais: constitucionalismo social na globalização*. Coordinación de Marcelo Neves *et al.* y revisión técnica de Pedro Ribeiro y Ricardo Campos. São Paulo: Saraiva.
- Weyermüller, A. R. (2014). O estado ambiental da adaptação: um novo paradigma. *Revista da Ajuris*, 41(134): 29-56. <http://www.ajuris.org.br/ojs2/index.php/revajuris/article/view/194/130>

Nanoquímica, un campo de conocimientos de alto valor educativo y disciplinar

Nanochemistry, a field of knowledge with high educational and disciplinary value

Jorge Meinguer Ledesma*

ABSTRACT: Nanochemistry is a field of knowledge focused on obtaining and characterizing the materials at the nanoscale. It is based on bottom-up synthesis methods that involve molecular self-assembly processes, as well as tools, models and approaches that are specific to chemistry. In the last decades, this subdiscipline has made valuable contributions to the fields of research, to the industry, technology and to the environmental care. In this work, the historical development, basic notions, as well as some representative techniques and applications of nanochemistry are analyzed in order to show its disciplinary value. In general, the educational proposals referenced in this documentary research allow to accentuate the multi and interdisciplinary nature of nanochemistry. Subsequently, aspects that allow justifying its educational relevance are discussed. The last part of this work offers a description of various proposals that have been developed in high school and in the initial stages of university education regarding the teaching of contents related to nanochemistry, since these can guide and strengthen the educational work in this field.

KEYWORDS: nanochemistry, chemistry teaching, chemistry curriculum, nanotechnology education, bottom-up approach.

RESUMEN: La nanoquímica es un área de conocimientos enfocada en la obtención y la caracterización de materiales en la escala nanométrica. Se fundamenta en métodos de síntesis ascendente (*bottom-up*) que involucran procesos de autoensamblaje molecular, así como herramientas, modelos y aproximaciones que son propios de la química. En las últimas décadas esta subdisciplina ha hecho valiosas contribuciones a los ámbitos de la investigación, la industria, la tecnología y el cuidado del medio ambiente. En este trabajo, se analiza el desarrollo histórico, las nociones básicas, así como algunas técnicas y aplicaciones representativas de la nanoquímica con la finalidad de mostrar su valor disciplinar. En general, las propuestas educativas referenciadas en esta investigación documental permiten acentuar la naturaleza multi e interdisciplinar de la nanoquímica. Posteriormente, se discuten aspectos que permiten justificar su relevancia educativa. En la última parte de este manuscrito se ofrece una descripción de diversas propuestas desarrolladas en el bachillerato y en las etapas iniciales de la formación universitaria en torno a la enseñanza de contenidos que guardan relación con la nanoquímica, ya que estas pueden orientar y robustecer el trabajo pedagógico en este campo.

PALABRAS CLAVE: nanoquímica, enseñanza de la química, currículo de química, educación en nanotecnología, metodología *bottom-up*.

Recibido: 4 de mayo 2021.

Aceptado: 26 de julio 2021.

Publicado: 25 de agosto 2021.

* Universidad Nacional Autónoma de México, Colegio de Ciencias y Humanidades, México.
Correspondencia: jormeinguer@yahoo.com.mx



Introducción

En las últimas décadas la química ha abierto nuevas rutas de investigación multidisciplinar al fusionar conocimientos de sus cinco áreas clásicas representadas por la química orgánica, la química inorgánica, la química teórica computacional, la química analítica y la fisicoquímica (Atkins, 2013). Un ejemplo de ello es la nanoquímica, un campo que permite sintetizar materiales o sistemas complejos mediante métodos basados en el autoensamblaje molecular (Alonso-Núñez, 2008). El prefijo nano es un derivado del latín *nanus* que significa enano en español y hace alusión a la milmillonésima parte de un metro (1×10^{-9} m). Para tener una idea más clara de lo diminuta que es la escala nanométrica, se pueden citar algunos ejemplos como el diámetro de un cabello humano de aproximadamente 75,000 nm, el de un glóbulo rojo de 3,000 nm y la distancia entre dos átomos de oro en un anillo o moneda de este elemento químico es de 0.3 nm. En consecuencia, estudiar el mundo nano es situarse en el marco de acción de los átomos y las moléculas (Takeuchi, 2011). Un escenario afín para la química, al constituir un marco explicativo común en el estudio de las propiedades, la composición y la transformación de la materia.

La nanoquímica engloba aquellas actividades que utilizan las aproximaciones, herramientas y modelos tradicionales de la química para la obtención de materiales en escala nanométrica. Los productos nanoestructurados así obtenidos poseen diversas aplicaciones que van desde la catálisis y la obtención de fármacos de mayor especificidad hasta la producción de celdas fotovoltaicas, dispositivos ópticos, semiconductores y polímeros reforzados o biodegradables (Fasenko y Yatsenko, 2018).

En el ámbito escolar, la comunicación de aspectos relacionados con la nanoquímica se devela como una cuestión pertinente por tres razones: la primera es que, al ser un área de investigación reciente, su abordaje en las aulas y laboratorios permite dotar de actualidad el proceso de enseñanza y aprendizaje de la química; la segunda se relaciona con la posibilidad de emprender un proceso de enseñanza-aprendizaje del tema basado en la contextualización, al mostrar la efectividad que poseen las aplicaciones que se desprenden de la nanoquímica en la resolución efectiva de problemas que impactan la vida social, económica y ambiental, y, la tercera razón se vincula con promover en el estudiantado la construcción de una opinión informada sobre los beneficios, limitaciones y riesgos asociados con la nanoquímica en particular y con la nanotecnología en general, un requisito indispensable para promover la participación en el debate público sobre el tema.

Algunos especialistas señalan que promover el diálogo informado entre todos los sectores involucrados en el desarrollo de las nanociencias y de manera externa con la sociedad es la forma más loable y efectiva para que los diversos productos que genera este campo resulten beneficiosos para las mayorías y mantengan una armonía con el medio ambiente (Strand y Nydal, 2008; Delgado, 2011). Lo que se busca es la construcción de un entendimiento ge-

nuino de la relevancia e implicaciones de las nanociencias por parte de la sociedad, el cual contribuya a robustecer sus criterios de gobernanza¹ (Delgado, 2012). La educación formal e informal tienen un papel clave en la consecución de este objetivo, pues tanto las instituciones educativas como los medios divulgativos constituyen las vías principales para acercar los conocimientos y avances que genera la investigación nano a la sociedad. La formación de una ciudadanía crítica y participativa en materia de ciencia y tecnología es uno de los objetivos clave tanto de las sociedades democráticas como de los paradigmas educativos contemporáneos (Santos y Auler, 2019).

En los siguientes párrafos se abordarán algunos antecedentes históricos de la nanoquímica, sus conceptos básicos, su metodología, algunas aplicaciones representativas, así como su relevancia y presencia en el ámbito escolar.

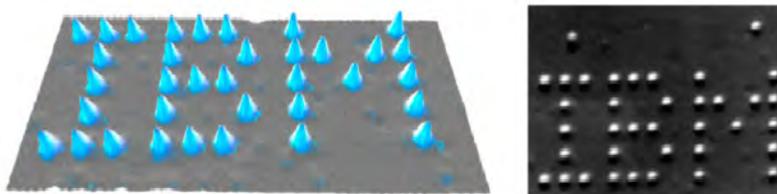
Antecedentes históricos

Como primer referente de la nanoquímica se puede señalar una conferencia dictada por el connotado físico Richard Feynmann en 1959 en el Instituto Tecnológico de California (Caltech), titulada como *There's plenty of room at the bottom* (hay mucho espacio en el fondo). En esta charla académica Feynmann planteó la posibilidad de manipular la materia átomo por átomo para crear materiales con propiedades insólitas o poco conocidas (Feynmann, 1960). A su vez, marcó la pauta para la obtención de materiales por los dos enfoques más importantes que posee la nanotecnología, la metodología *bottom-up* (síntesis ascendente) tradicionalmente implementada por los químicos, la cual consiste en la construcción desde lo pequeño hacia lo grande y la metodología *top-down* (síntesis descendente) basada en la miniaturización que es convencionalmente usado por la física (Bensaude-Vincent, 2004). Cabe señalar que, aunque estos dos enfoques fueron desarrollados de forma independiente en la actualidad no rivalizan, sino que son complementarios. Un ejemplo de ello es su utilización conjunta tanto en cursos formativos como en investigaciones enmarcados en la ciencia e ingeniería de materiales.

Tuvieron que pasar 30 años para que las ideas de Feynmann sobre la posibilidad de incidir en el comportamiento de la materia en la escala nanométrica cristalizaran. Esto ocurrió en el año 1989, cuando científicos de la empresa IBM utilizando los avances de la época sobre microscopía de efecto túnel (STM), lograron obtener un arreglo de 35 átomos individuales de xenón en un sustrato de níquel con la forma de las tres letras del logo de dicha compañía. Este acontecimiento se convirtió en un hito para la ciencia moderna, pues por primera vez se conseguía colocar con precisión una cantidad de átomos determinada sobre una superficie plana (Bayda y Adeel, 2020).

¹ La gobernanza se entiende como un proceso configurado por una multiplicidad de reglas formales e informales que establecen las normas del juego entre los distintos actores (y niveles) que intervienen en el proceso de toma de decisiones (García, 2012).

FIGURA 1. Logotipo de la compañía IBM obtenido en 1989, al colocar 35 átomos de xenón sobre un sustrato de nitrato de níquel mediante microscopía de efecto túnel (STM).



Fuente: Imagen tomada de Bayda y Adeel (2020).

En 1985, el descubrimiento que contribuyó a sentar las bases de la nanoquímica fue reportado por un equipo de investigación de la Universidad de Rice, conformado por los químicos Harold W. Kroto, Robert F. Curl y Richard E. Smalley, quienes comunicaron el hallazgo de una molécula esférica de 60 átomos de carbono con una geometría muy similar a un balón de fútbol y de tan solo 0.7 nm de diámetro. La obtención de esta molécula hasta el momento desconocida se dio en el marco de un experimento consistente en vaporizar grafito con un láser a una temperatura superior a los 10,000 °C para simular agregados de carbono presentes en el medio interestelar. La molécula esférica resultante fue nombrada fullereno C_{60} y es considerada el primer alótropo nanoestructurado reportado del elemento carbono. Por este trabajo, el equipo liderado por Harold W. Kroto se hizo merecedor del Premio Nobel de Química en el año 1996. En la actualidad, se han sintetizado fullerenos de varios tamaños, siendo el más pequeño el de 20 átomos de carbono C_{20} , pero el más abundante y representativo sigue siendo el C_{60} (Martín, 2011). La investiga-

FIGURA 2. Equipo de investigación que reportó el hallazgo de los fullerenos en 1985. De izquierda a derecha, Sean O'Brien, Richard Smalley, Robert Curl, Harold Kroto y James Heath.



Fuente: Imagen tomada de (Martín, 2011).

ción en torno a los fullerenos se extendió en años posteriores dando como resultado la obtención de unas moléculas cilíndricas denominadas nanotubos de carbono (NTC), nanoestructuras que se caracterizan por su alta resistencia.

El enfoque *bottom-up* en la obtención de nanoestructuras y nanomateriales fue popularizado lúcidamente por Richard E. Smalley al inicio del siglo XXI, gracias a su participación en un polémico y famoso debate sobre la forma de conceptualizar la nanotecnología que sostuvo con el ingeniero del MIT, Erick Drexler. Este comentado debate se llevó a cabo entre los años 2001 y 2003 en dos revistas de divulgación científica norteamericanas *Scientific American* y *Chemical & Engineering News*, y ha sido estudiado arduamente por especialistas de las ciencias sociales para ilustrar el papel que detentan los medios de comunicación y aspectos para-científicos en la delimitación de una agenda en torno a campos tecnocientíficos emergentes (Kaplan y Radin, 2011). En el debate, R. Smalley comunicó con sagacidad los factores que la química toma en cuenta en la obtención de nanomateriales como es el caso del estudio de las condiciones de reacción, el uso de catalizadores, la consideración de la geometría, el tamaño, la reactividad y la selectividad de las especies reaccionantes, así como una variable muy importante resultante de los procesos de autoensamblaje molecular, las imperfecciones (Bueno, 2004). En contraposición de una visión basada en la obtención de algo que Drexler denominó ensambladores moleculares, una especie de máquinas nonoscópicas que permitirían el control posicional absoluto de átomos y moléculas en la obtención de nanomateriales. Con el pasar de los años esta visión de Drexler se develó errónea. De hecho, las imperfecciones defendidas por Smalley poseen un papel tan relevante en la síntesis de algunos materiales nanométricos que gracias a estas adquieren funciones específicas y distintivas. Un ejemplo de ello son los vidrios dopados con moléculas orgánicas obtenidos por el método sol-gel, sus propiedades ópticas y alta estabilidad térmica se deben en gran medida a la geometría imperfecta de la matriz vidriosa (Sebastián, 2018).

Otro antecedente importante de la nanoquímica es la denominada química supramolecular. En 1987, los químicos Donald J. Cram, Charles J. Pedersen y Jean-Marie Lehn, recibieron el Premio Nobel de Química por diseñar moléculas que imitan el comportamiento de algunas sustancias naturales implicadas en procesos biológicos. Estos investigadores demostraron que en los laboratorios se pueden obtener moléculas altamente selectivas que pueden reaccionar con otros átomos, tal como lo hacen las enzimas en los procesos celulares (Munuze, 2014). Para ello, implementaron técnicas avanzadas de química orgánica acompañadas de complejos cálculos teóricos. Los resultados reportados por el equipo de Donald Cram aumentaron el interés y el dominio de la selectividad en la obtención de complejos químicos. Hoy en día, la selectividad es un factor crucial en el autoensamblaje molecular, proceso en el que está fundamentada la nanoquímica. Finalmente, una investigación que puede considerarse también como un precedente histórico de la nanoquímica fue el descubrimiento de los polímeros conductores por los químicos Alan Hegger,

Alan MacDiarmid y Hideki Shirakawa por el cual recibieron el Premio Nobel de Química en el año 2000 (Aguayo y Zarzuela, 2011).

Generalidades de la nanoquímica

La nanoquímica robustece el horizonte de investigación de la química al ocuparse de la síntesis y la caracterización de materiales desarrollados a través de técnicas o procedimientos basados en el autoensamblaje molecular (Contreras y Cardoso, 2015). Este fenómeno se basa en el aprovechamiento de fuerzas débiles o intermoleculares como las de Van der Waals, los puentes de hidrógeno y las interacciones electrostáticas que se dan entre las entidades químicas reaccionantes. Una cuestión que favorece la espontaneidad y cierto grado de control termodinámico es que, en el autoensamblaje, los átomos y las moléculas buscan adquirir un estado de mínima energía difundiendo sobre superficies o formando estructuras que les favorezcan energéticamente y potencien el crecimiento molecular (Ozin y Arsenault, 2015).

Lo que hace particular e interesante tanto a la nanoquímica como a las nanociencias en general, es que en la escala nanométrica las propiedades de la materia cambian drásticamente debido a efectos cuánticos. Este inusitado comportamiento puede llegar a contradecir lo que percibimos con nuestros sentidos. Por ejemplo, cuando los metales como el oro, la plata y el cobre se dividen en diminutos fragmentos que rozan la escala nanométrica su brillo metálico desaparece paulatinamente dando lugar a tonalidades poco convencionales. Se sabe que las esferas de oro de 100 nanómetros (nm) adquieren una tonalidad naranja, las esferas de 50 nm son verdes y las de 25 nm son rojas. Este hecho se debe a que los electrones libres de conducción presentes en las superficies de las esferas metálicas de tamaño nanoscópico pueden oscilar por efecto de la luz y absorber energía (López-Quintela, 2015). De lo anterior, se puede señalar que otra característica distintiva de la nanoquímica es que suele auxiliarse y aplicar las bases teóricas de la mecánica cuántica en la síntesis y caracterización de materiales.

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, el enfoque que ha acompañado el desarrollo de la nanoquímica es el denominado *bottom-up*, el cual consiste en utilizar grupos de átomos y moléculas como precursores o bloques de construcción de estructuras de orden superior (Aguayo-González y Zarzuela, 2011). Las técnicas *bottom-up* se pueden clasificar en dos grandes categorías de acuerdo con el entorno físico en el que se obtienen los nanomateriales, estas son técnicas en fase gas y fase líquida (Sebastián, 2018). Ejemplos de técnicas *bottom-up* que se llevan a cabo en fase gaseosa son la deposición en vapor y la ablación láser. Mientras que en los métodos de fase líquida destacan las microemulsiones, la síntesis sol-gel y los basados en la fotoquímica (Ozin y Arsenault, 2015). Otro aspecto importante a considerar en la nanoquímica es que se auxilia de diversas técnicas de la microscopía moderna en la caracterización de las propiedades fisicoquímicas de los nanoma-

teriales, siendo las más usuales la microscopía de efecto túnel (STM) y de barrido (SEM).

Técnicas en fase gaseosa

La deposición en vapor por vía química CVD (del inglés *chemical vapor deposition*) es una de las técnicas más representativas en fase gaseosa, se basa en la dispersión de un precursor químico en estado gaseoso sobre un sustrato donde se pretende llevar a cabo el crecimiento de un nano o micromaterial (Sebastián, 2018). Generalmente, los procesos de síntesis basados en CVD se llevan a cabo en cámaras de alto vacío, son altamente selectivos y se utilizan para la obtención de algunas nanoestructuras sólidas como el óxido de silicio (SiO_2) y los nanotubos de carbono (NTC). Por su parte, la técnica de ablación láser consiste en someter un blanco a una intensa radiación con ayuda de un láser con el objetivo de escindir en este sus constituyentes, para que posteriormente estas sustancias vuelvan a reaccionar formando entidades químicas diferentes, las cuales son denominadas como *nanoclusters* (Cruz-Alonso *et al.*, 2018). La síntesis por ablación láser es un proceso menos selectivo que la CVD, pero es una técnica más limpia porque genera menor cantidad de residuos y es usualmente empleada para la manufactura de algunos superconductores de alta temperatura (Bäurle, 2013).

Técnicas en fase líquida

Las técnicas de fase líquida son las más utilizadas en la nanoquímica, al involucrar la acción de un disolvente y procedimientos relacionados con la cinética de cristalización de los productos deseados, dos aspectos metodológicos históricos y distintivos del trabajo experimental que emprenden los químicos. Otros elementos a considerar en las técnicas *bottom-up* en fase líquida es el uso de agentes reductores y estabilizadores. Los primeros aportan electrones en un medio de reacción, favoreciendo con ello, los procesos de autoensamblaje molecular. Los segundos suelen ser de gran utilidad en el control de la morfología de los nanomateriales (Contreras y Cardozo, 2015).

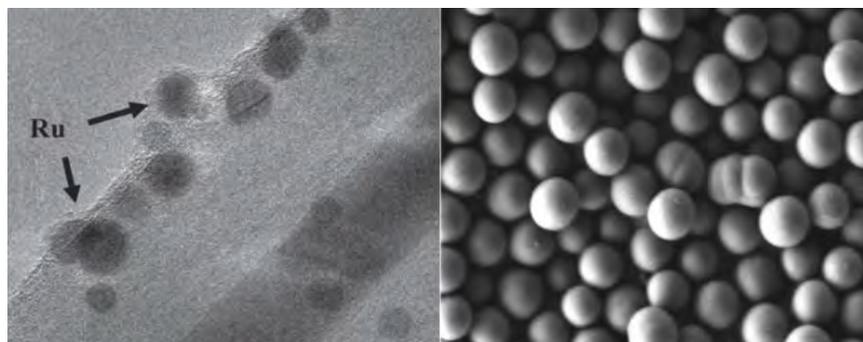
Las técnicas *bottom-up* en fase líquida son más numerosas que las implementadas en fase gas, por motivos de extensión; y dado que no es menester de este trabajo cubrir todas las técnicas a detalle, en los siguientes párrafos solamente se hará referencia a la síntesis por sol-gel, microemulsiones y vía fotoquímica. La técnica sol-gel es un proceso químico ampliamente utilizado en la obtención de nanomateriales cuya estructura principal son óxidos metálicos. Generalmente, se parte de una solución química (sol) que actúa como precursor de una red integrada de partículas o de una red de polímeros (Palma y Acuña, 2010; Zanella, 2012; Rojas, 2015). Los precursores químicos más utilizados en este método son los cloruros y los alcóxidos metálicos, compuestos que en solución experimentan reacciones de condensación y polimerización para dar lugar a una red tridimensional en forma coloidal (gel). El gel resultante se deshidrata paulatinamente o en ocasiones se calcina para obtener los

productos deseados (De Jong, 2009). Con esta técnica se pueden sintetizar nanomateriales de alta pureza y homogeneidad. Ejemplo de nanomateriales que se producen por sol-gel son combinaciones de óxidos de silicio, titanio y vanadio que al funcionalizarlos con iones de tierras raras pueden ser utilizados para la fabricación de láseres y sensores (Rojas, 2015).

Por su parte, las microemulsiones son dispersiones termodinámicamente estables formadas por líquidos inmiscibles de diferente polaridad (por ejemplo, agua/aceite). Las microemulsiones convencionalmente son estabilizadas por la adición de un surfactante o tensoactivo que permite la formación de micelas con un rango de tamaño de 2 a 15 nm (Aegerter *et al.*, 2008; Zanella, 2012). En esta técnica, las micelas son las encargadas tanto de difundir los precursores químicos como de propiciar el crecimiento molecular. Algunas características importantes de las microemulsiones son su isotropía, transparencia y que a diferencia de las emulsiones macroscópicas no requieren de un aporte energético para su formación (Sebastián, 2018). Además, con esta técnica es posible controlar las dimensiones, la morfología y la composición de los productos sintetizados. Ejemplos del tipo de nanoestructuras que se pueden obtener con microemulsiones son las partículas binarias de elementos metálicos (Pt/Pd, Pt/Ru, Pt/I), así como nanopartículas de óxidos y sulfuros metálicos (Takeuchi, 2011). Esta técnica también es utilizada en la elaboración de nanomateriales con repercusiones en la industria de los fármacos y los cosméticos.

Por su parte, la obtención de nanoestructuras basada en la fotoquímica se fundamenta en la irradiación de un medio de reacción con haces de luz de diferentes longitudes de onda. Esto con la finalidad de generar especies reductoras altamente reactivas como electrones, radicales o especies oxidadas que favorezcan la formación de nanoestructuras (Ozin y Arsenault, 2015). En las técnicas fotoquímicas usualmente se utilizan energías por debajo de los 60 eV, se caracterizan por ser procesos rápidos y limpios que generan agregados

FIGURA 3. Izquierda: imagen obtenida por microscopía electrónica de transmisión (TEM) de nanopartículas de rutenio sintetizadas por la técnica de microemulsiones. Derecha: imagen obtenida con microscopía electrónica de barrido (STM) de esferas de óxido de silicio producidas con el método sol-gel.



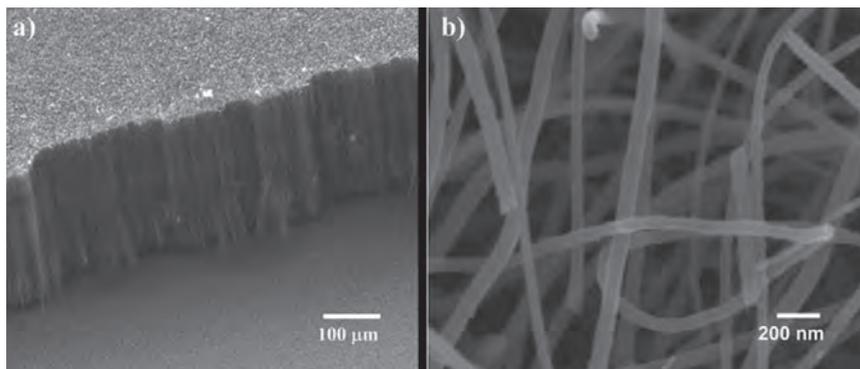
Fuente: Imagen izquierda tomada de Alonso-Núñez (2008); derecha, de Zanella (2012).

moleculares sólidos (Zanella, 2012). Los métodos fotoquímicos son utilizados en la obtención de materiales con metales nobles, los cuales pueden ser empleados como fotocatalizadores y en la elaboración de dispositivos ópticos (Névarez-Martínez y Espinoza-Montero, 2017).

Microscopía

Un elemento de gran importancia en la nanoquímica es la microscopía, una ruta instrumental convencionalmente utilizada para caracterizar las propiedades estructurales y fisicoquímicas de los nanomateriales sintetizados. Las técnicas microscópicas de las que se apoya la química y la nanotecnología consisten, en general, en someter un material o blanco a un tipo de radiación específica por medio de una sonda y decodificar las señales subyacentes mediante complejos sistemas de detección, los cuales pueden estar basados en las interacciones que se dan entre los electrones presentes en la muestra y los de la sonda o en la medición de propiedades físicas específicas como el voltaje, la intensidad de corriente y la intensidad de un campo magnético (Takeuchi, 2011; Contreras y Cardozo, 2015). Con ayuda de la microscopía, se pueden obtener de manera indirecta imágenes y datos relevantes sobre las propiedades de nanoestructuras específicas.

FIGURA 4. Imágenes de nanotubos de carbono (NTC) obtenidas con microscopía electrónica de barrido (SEM).



Fuente: Tomadas de Alonso-Nuñez (2008).

Las técnicas microscópicas más usuales en la nanoquímica y que han estado presente en su desarrollo histórico son la microscopía de efecto túnel (STM), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la microscopía electrónica de barrido (SEM). En los últimos años y en menor medida, algunas investigaciones han incorporado también el uso de la microscopía de fuerza atómica (AFM), esto debido a la importancia tecnológica que ha cobrado el estudio de las superficies en el campo de los nanomateriales (Contreras y Cardozo, 2015).

Aplicaciones e implicaciones socioambientales de la nanoquímica

En las últimas décadas tanto la nanoquímica como la nanotecnología han ampliado significativamente y diversificado sus campo de aplicaciones. Los materiales que está generando la química en la escala nanométrica tienen aplicaciones en el campo de la catálisis, los polímeros, los medicamentos, la fabricación de recubrimientos, dispositivos ópticos y fotónicos, en la elaboración de fragancias y aditivos alimenticios, así como en la biotecnología y la remediación ambiental (Pagliaro, 2015). En los siguientes párrafos se describen algunas aplicaciones de la nanoquímica en el ámbito de la catálisis, la síntesis de polímeros y la ciencia de materiales. Se ha determinado referenciar únicamente estos tres nichos de aplicación porque constituyen áreas representativas del conocimiento químico y por las características de este trabajo.

Un catalizador es una sustancia que incrementa la rapidez de una reacción química, esto al modificar su cinética y generar un mecanismo de reacción alterno con una energía de activación menor (Díaz, 2011). En la escala nanométrica destaca el campo de la catálisis heterogénea, es decir, sistemas en donde los catalizadores se dispersan en materiales altamente porosos. La disminución en el tamaño de partícula en los catalizadores permite que su superficie quede más expuesta, de tal modo que una alta cantidad de átomos presentes en esta se conviertan en sitios activos, incrementando la eficiencia de una reacción. Ejemplos de catalizadores nano son los agregados moleculares de óxidos y sulfuros metálicos producidos por las técnicas sol-gel. Se ha reportado que partículas de óxido de titanio (TiO_2) favorecen algunos procesos de biorremediación ambiental, como es el caso de la adsorción del dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), dos gases contaminantes presentes en la atmósfera. El TiO_2 como catalizador también es referenciado en algunos métodos recientes que guardan relación con la purificación del agua (Escobar y Solís-Casados, 2020). En la literatura se menciona que algunos nanocatalizadores hechos a base de sulfuros de molibdeno con trazas de níquel (Ni) y cobalto (Co) soportados en alumina (Al_2O_3) optimizan la remoción de los compuestos orgánicos de azufre (COA) en diferentes fracciones del petróleo (Álvarez-Amparán, Cedeño-Caero, 2020). Otro grupo de catalizadores nanoestructurados por destacar son los realizados a base de paladio (Pd) y soportados en materiales aislantes o semiconductores que al ser dopados con tierras raras resultan eficientes en la reducción de CO e hidrocarburos (Díaz, 2011). Actualmente, más del 90% de los procesos químicos en el mundo se auxilian de la catálisis y los nanocatalizadores ocupan un lugar importante.

En el ámbito de los polímeros, la nanoquímica está contribuyendo a mejorar las propiedades de estos materiales incorporando nanoestructuras específicas. Por ejemplo, cuando se adicionan nanopartículas de sílice a polímeros termoplásticos como el poliuretano se mejoran sus propiedades mecánicas,

térmicas y de adhesión (Martín y Vega, 2013). En la literatura se menciona que, al enriquecer materiales como el acrílico con nanopartículas de cobre se incrementa su comportamiento antibacteriano, un hecho relevante en el ámbito biomédico porque el acrílico termopolimerizable (PMMA) es muy utilizado en la elaboración de prótesis de diversos tipos (Camacho y Arenas, 2015). Otro tipo de materiales provistos por la nanoquímica y de amplia repercusión en la industria de los polímeros son las nanofibras, esto es, fibras con diámetros de hasta 100 nm que pueden ser de origen natural o sintético. Este tipo de fibras se suelen producir por el método de electrohilado y mejoran la calidad de materiales ya existentes debido a su reducida área superficial. Actualmente, se utilizan nanofibras para la elaboración de ropa de protección y deportiva, en materiales que permiten la liberación controlada de medicamentos, soportes para el crecimiento celular y en la elaboración de membranas poliméricas (García, 2013).

Otra línea de investigación representativa de la nanoquímica es la relacionada con la obtención de materiales cuya base estructural son los alótipos nanoestructurados del elemento carbono, como es el caso de los fullerenos, nanotubos de carbono (NTC) y el grafeno. En las siguientes líneas se hará referencia a algunas aplicaciones basadas en los dos primeros, pues la investigación química en torno al grafeno es relativamente reciente y se encuentra en proceso de consolidación. Las aplicaciones más citadas de los fullerenos son tres: 1) se suelen utilizar para fabricar lubricantes en la industria automotriz; 2) constituir un componente importante de células fotovoltaicas orgánicas, y, 3) poder ser empleadas como nanoestructuras inhibitorias de algunos virus.

En los lubricantes, las moléculas C_{60} actúan como nanorrodamientos interponiéndose con las partes metálicas de los motores, reduciendo la fricción y aumentando su potencia (Takeuchi, 2011). En los paneles solares, los fullerenos son incorporados con el propósito de reducir la concentración de silicio y optimizar el funcionamiento de estos dispositivos. En este tipo de células fotovoltaicas, un polímero orgánico se encarga de absorber la luz solar y provocar la excitación de los electrones, los fullerenos por sus propiedades semiconductoras actúan como aceptores, favoreciendo el flujo de estas partículas en estos dispositivos (Bolaños y Álvarez, 2018). En el ámbito de la biomedicina, los fullerenos pueden ser útiles para administrar el principio activo de medicamentos de alta especificidad, esto por su alta capacidad de unirse a las proteínas y moléculas complejas. Concretamente, se ha reportado que derivados del fullereno C_{60} tienen la propiedad de inhibir el desarrollo de algunos virus como el VIH y disminuir su propagación (Castro *et al.*, 2017). En lo concerniente a los nanotubos de carbono destaca su utilización en el refuerzo de materiales poliméricos y en diversos procesos basados en la funcionalización química. Por ejemplo, cuando se adicionan NTC a polímeros tradicionales, estos mejoran sus propiedades mecánicas, térmicas, su resistencia, durabilidad e incluso en algunos casos les confieren la propiedad de conductividad

(Isaza *et al.*, 2019). Por otra parte, cuando los NTC son funcionalizados, esto es, cuando se incorporan a su estructura diversos grupos funcionales o se dopan con metales, se obtienen nanomateriales híbridos útiles en la fabricación de biosensores, baterías y materiales de la industria aeroespacial (Kaurosis *et al.*, 2010). El campo de los nanomateriales hechos a base de carbono es muy versátil y ha generado una gran cantidad de publicaciones científicas en la última década.

Al ser la nanoquímica un área de investigación emergente tiene asociada una fuerte carga de incertidumbre, relacionada principalmente con la toxicidad y el impacto ambiental de los materiales que está generando para el ramo de la industria y la investigación. Es por ello que filósofos, sociólogos, economistas, educadores y divulgadores aportan contribuciones valiosas en lo relativo al análisis ético, económico, socioambiental y educativo de la investigación nano, reforzando su dimensión interdisciplinar (Foladori e Invernizzi, 2018). Algunas acciones que están planteando estos expertos para aminsonar los riesgos de las nanociencias y la nanotecnología son la implementación de protocolos de ensayo de las nanopartículas de origen sintético, el establecimiento de normas que permitan regular sus repercusiones ambientales y en materia de sanidad, el estudio de su relevancia e implicaciones en la educación científica formal e informal, así como una serie de recomendaciones en materia de gobernanza de la nanotecnología (Pyrrho y Schramm, 2019).

Por lo anterior, se puede aseverar que la nanoquímica en particular y la nanotecnología en general poseen un rostro jánico, al poder contribuir significativamente en el bienestar humano, al potenciar el desarrollo tecnológico y sostenible. Sin embargo, si sus avances no cuentan con una regularización basada en la ética, el cuidado del medio ambiente y el bienestar común, así como sus desarrollos pueden ser desvirtuados y generar enfermedades, agudizar problemáticas ambientales, conflictos sociales y económicos producto de la sobreexplotación de recursos y su posterior comercialización. Esta dualidad es una cuestión muy importante a tener en cuenta en la labor educativa en lo que respecta a la nanoquímica.

Relevancia y problemas asociados con la enseñanza de la nanoquímica

Como se ha señalado en la introducción de este trabajo, la incorporación de asignaturas y contenidos relacionados con las nanociencias y la nanotecnología en los diferentes niveles educativos puede redituarse en un entendimiento más profundo y reflexivo tanto de la relevancia como de las implicaciones tecnológicas, sociales y ambientales de este campo de conocimientos. Los procesos de diálogo social y la toma de decisiones informadas (Delgado y Magaña, 2012) son elementos que forman parte de lo que en la literatura se ha denominado como gobernanza precautoria de la nanotecnología, esto es, una serie de criterios que permiten establecer una política pública e incluyente en ma-

teria de nanociencia y nanotecnología que garantice la seguridad, el desarrollo social, la innovación y la preservación ambiental (Saldívar, 2021). En este contexto, las universidades e instituciones de educación obligatoria juegan un papel importante en lo relativo a garantizar la inclusión social, establecer códigos de conducta basados en el conocimiento y fortalecer los mecanismos de participación en los procesos de diálogo social vinculados con la investigación nano.

Otras razones que justifican el impulso del trabajo educativo en torno a la nanoquímica en los niveles medio y superior son la necesidad de formar vocaciones científicas en el campo, ofrecer una visión correcta y equilibrada de esta subdisciplina, así como dotar de actualidad al proceso de enseñanza-aprendizaje de la química. En el contexto actual, las profesiones, áreas de investigación y empleos relacionados con la síntesis de materiales en la escala nanométrica se han incrementado y diversificado notablemente, resultando oportuno promover en el ámbito escolar el interés por esta área de investigación, para que, paulatinamente, un mayor número de estudiantes decidan especializarse (Plagiario, 2015). Asimismo, promover una visión correcta y más prudente de la nanoquímica y de la nanotecnología en general obedece a haber constatado que tanto en los medios de comunicación como en las redes sociales prevalece una imagen de la investigación nano errónea o deformada, al asociársela con metas ficticias, aplicaciones con una alta carga especulativa y una retórica falaz proveniente de la pseudociencia. Cuestiones que distan mucho de la realidad imperante en los laboratorios y centros de investigación. Para hacer frente a este problema es necesario comunicar en las aulas y los laboratorios un panorama de la nanoquímica que parta de aquellos avances o aplicaciones que cuenten con un amplio respaldo entre la comunidad de especialistas.

La labor educativa en torno a la nanoquímica permite referenciar aspectos novedosos relacionados con los procesos de síntesis, conectarlos con el estudio de otros contenidos donde la innovación adquiera valor, así como involucrar a los estudiantes con tres rasgos que son distintivos de la ciencia contemporánea: la interdisciplinariedad, la incertidumbre y la complejidad (Meinguer, 2019). Los procesos de síntesis química en la escala nanométrica requieren de una visión metodológica que articule modelos, herramientas y aproximaciones de las áreas clásicas de la química, así como elementos teóricos e instrumentales provenientes de otras disciplinas científicas. No obstante, es importante enfatizar en la labor educativa sobre el tema que, la dimensión multi e interdisciplinar de la nanoquímica no se agota en la construcción de un marco teórico-metodológico robusto e innovador, sino debe contemplar también la influencia de diversas disciplinas sociales al analizar el impacto que tienen sus desarrollos en la esfera de lo económico, ético, social, ambiental y cultural. Esto último conecta con el segundo rasgo que se postula como distintivo de la ciencia contemporánea: la incertidumbre. En el caso concreto de la investigación nano, la incertidumbre se relaciona con los efectos negativos que sus apli-

caciones pueden generar en diversos escenarios, pero también con la posibilidad que tiene la ciencia y los demás sectores involucrados en corregirlos. La interdependencia disciplinar presente en la visión teórica-metodológica de la nanoquímica y la tensión derivada de promover innovaciones cuyos efectos no están completamente determinados y regulados, hace que esta área del conocimiento químico adquiera una alta complejidad. Por lo anterior, se puede afirmar que, diseñar e implementar estrategias basadas en el mundo de lo nano es una labor difícil de emprender, al requerir impulsar una formación que vaya más allá del dominio disciplinar de un tema.

En la literatura se han reportado algunos obstáculos epistemológicos que se deben considerar en el ámbito de la enseñanza y divulgación de las nanociencias. Los más importantes son:

- El manejo de una escala sumamente pequeña.
- La ineludible presencia de conceptos abstractos.
- El carácter multi e interdisciplinar de las nanociencias y la nanotecnología.
- La existencia de efectos vinculados con el tamaño y forma de los objetos.
- La existencia de ideas preconcebidas sobre la investigación nano (Sánchez-Mora y Tagueña, 2011).

Para atenuar estos obstáculos epistemológicos, en la literatura se recomienda hacer uso de un discurso analógico al comunicar conceptos complejos y relacionarlos con aspectos de la vida cotidiana, así como referenciar sustancias y organismos que resulten familiares al estudiantado. Se sugiere comunicar el tamaño y las funciones de los virus y moléculas como la del ADN, la penicilina o la glucosa para situar y despertar el interés por el comportamiento de la materia en la escala nanométrica (Takeuchi, 2011). Otras cuestiones relevantes a considerar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la nanoquímica son informar sobre los avances conseguidos a nivel local, nacional e internacional, incorporar el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) para modelar estructuras, materiales y dispositivos que tienen su origen en la escala nanométrica, así como crear escenarios de aprendizaje donde se propicie el debate racional de ideas, la indagación y la argumentación escolar (García-Betancourt, 2017). En el primer caso, el análisis de fuentes provenientes de la comunicación pública de la ciencia como complemento de los libros de texto y la organización de charlas divulgativas pueden ser de gran utilidad, al ser rutas que permiten ofrecer información científica de forma precisa, clara, respaldada y contextualizada, resultando asequible para estudiantes de niveles medios y de la etapa inicial en universidades (Meinguer, 2018). En lo que respecta al uso de la TIC, los *softwares*, animaciones digitales y otro tipo de herramientas digitales resultan esenciales para modelar la estructura, los enlaces, propiedades, la cinética de las reacciones,

los procesos de autoensamblaje y el comportamiento de las nanoestructuras y materiales obtenidos con la metodología *bottom-up*. Las TIC se consideran un elemento imprescindible y distintivo tanto en el trabajo metodológico como educativo de las nanociencias (Ribeiro y de Souza-Filho, 2014).

En el plano didáctico, es necesario diseñar actividades que contribuyan al desarrollo de habilidades teóricas, experimentales, de análisis, comunicación y participación, debido a que se ha mencionado que las áreas de oportunidad para los alumnos especializados en nanoquímica u otras áreas relacionadas con esta subdisciplina trascienden los ámbitos de la investigación y la enseñanza (Reviglio, 2014). Fomentar el pensamiento crítico: la indagación y la participación en la educación nano es apostar por una formación integral, una meta educativa que es ampliamente reconocida en todas las áreas de conocimiento científico (Meinguer, 2021).

La nanoquímica en el currículum escolar

El avance de la nanoquímica en la educación ha sido más lento y limitado de lo conseguido en el ámbito de la investigación científica, tecnológica e industrial, pues aunque la mayoría de los países cuenta con especializaciones y grados universitarios que certifican los estudios en esta área de conocimiento, en la educación química que se imparte en los niveles obligatorios no suelen figurar contenidos relacionados con la investigación nano o son muy escasos, debido a que se les otorga poca relevancia en los programas de estudio (Pagliario, 2015). A pesar de ello, Jones y Blonder (2013) señalan que los enfoques para abordar contenidos relacionados con las nanociencias y la nanotecnología son muy diversos, sobre todo en las etapas iniciales de algunas carreras o especializaciones de corte científico en las universidades. Para estos autores, la educación nano requiere para su consolidación el establecimiento y validación de estándares tanto de aprendizaje como de evaluación. Al respecto, en la literatura se menciona que, en países de Europa y en EUA se están consolidando cursos intensivos en las etapas de pregrado para ahondar en aspectos relacionados con la nanoquímica. Estos cursos suelen tener una duración de cuatro a ocho semanas y se imparten a estudiantes que poseen conocimientos suficientes sobre química, física, matemáticas y biología (García-Betancourt, 2017; Pagliario, 2015). Un ejemplo es la propuesta del químico Geoffrey Ozin de la Universidad de Toronto, quién ha diseñado e implementado un curso de nanoquímica basado en la impartición de doce conferencias, las seis primeras son dictadas por connotados especialistas y abordan en su mayoría aspectos introductorios en el campo. Mientras que, las seis restantes son preparadas por los estudiantes con apoyo de un amplio material bibliográfico. El curso cierra con un espacio de discusión sobre propuestas innovadoras elaboradas por los alumnos sobre la síntesis, aplicación o regulación de nanomateriales. Esto con el propósito de incentivar el pensamiento creativo (Ozin y Cademartiri, 2011).

En Palermo, el investigador Mario Pagliario (2015) ha diseñado un curso de nanoquímica centrado en comunicar aspectos relevantes y novedosos sobre la síntesis de materiales nanoestructurados, instrumentación e implicaciones socioambientales. El curso tiene una duración de 180 horas y está dividido en seis semanas, inicia con la lectura y el análisis de contenidos relacionados con tres nanomateriales específicos en bibliografía especializada. Posteriormente, hay un módulo exclusivo para el trabajo en el laboratorio y finaliza con la elaboración de un artículo científico por los alumnos. Los autores de los libros de texto consultados en el curso son investigadores con amplia experiencia y trayectoria en la síntesis de nanomateriales (tabla 1). Por su parte, el trabajo de laboratorio está enfocado en el desarrollo de habilidades básicas en la síntesis de los nanomateriales estudiados previamente en la bibliografía. Por último, con la elaboración de un artículo científico se busca que los estudiantes sean capaces de articular conocimientos disciplinares y contextuales sobre los nanomateriales en cuestión, así como potenciar el desarrollo de habilidades de escritura y comunicación sobre la nanoquímica. Los contenidos, actividades y bibliografía del curso de Mario Pagliario se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Descripción del curso Nanoquímica, materiales funcionales y soluciones a problemas globales.

Contenido	Duración	Actividades	Material bibliográfico
1. ¿Por qué lo nano es diferente? Fundamentos de las nanociencias y la nanotecnología.	6 horas	Tres lecturas	► L. Cademartiri, G. A. Ozin, <i>Concepts of nanochemistry</i> , Wiley-VCH, 2009.
2. La ruta nanoquímica y nanomateriales básicos. Avances en los métodos de síntesis y ensamblaje de nanomateriales.	6 horas	Tres lecturas	► L. Cademartiri, G. A. Ozin, <i>Concepts of nanochemistry</i> , Wiley-VCH, 2009.
3. Nanomateriales porosos, poliméricos y biomiméticos.	12 horas (módulo doble)	Seis lecturas	► G. Cao, <i>Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties and applications</i> , Imperial College Press, Londres, 2004.
4. Nanomateriales en acción. Almacenamiento de energía, catálisis y recubrimientos.	6 horas	Tres sesiones de capacitación en el laboratorio	► M. Pagliario, <i>Nano-age: how nanotechnology changes our future</i> , Wiley-VCH, 2010.
5. Aprendizaje permanente y comunicación efectiva de la nanoquímica y la nanotecnología.	6 horas	Tres lecturas	► M. Tomczyk, <i>Nano innovation: what every manager needs to know</i> , Wiley-VCH, 2014. ► C. Qian, T. Siler, G. A. Ozin, <i>Exploring the possibilities and limitations of a nanomaterials genome: small</i> , 2015, 11, 64.

Fuente: Traducido de Pagliario (2015).

En el contexto iberoamericano, específicamente en el bachillerato destaca la guía didáctica elaborada por los académicos Pedro Serena, Noboru Takeuchi y Javier Tutor (2014). En este recurso educativo se ofrece una cantidad considerable de fichas didácticas que los docentes pueden consultar al abordar diferentes aspectos sobre las nanociencias y la nanotecnología, como es el caso de sus fundamentos teóricos, cuestiones generales sobre microscopía electrónica, la dimensión y efectos asociados con nanomateriales entre otros. En el caso concreto de la nanoquímica, se puede encontrar material sobre la síntesis de partículas de plata, nanomateriales basados en óxidos metálicos, nanocosméticos, nanosensores e implicaciones éticas y sociales vinculadas con el mundo de lo nano. La ventaja de esta publicación educativa es que las propuestas de tratamiento de los temas antes mencionados se pueden readaptar o adecuar a los objetivos de aprendizaje de un docente o una institución educativa.

Una metodología alternativa es la reportada por Meinguer (2019), en esta se analizan la estructura, propiedades y aplicaciones de los alótopos nanoestructurados del carbono (fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno) mediante la lectura, análisis y problematización de textos provenientes de la comunicación pública de la ciencia. El trabajo educativo de esta propuesta gira en torno al diseño de estrategias de análisis textual que contemplen la realización de investigaciones documentales y escenarios de debate con el propósito de que los estudiantes puedan articular aprendizajes disciplinares, contextuales y sobre la naturaleza de la ciencia que les permitan construir una interpretación amplia y crítica del tema. Por otra parte, Ribeiro *et al.*, 2018 informan que el uso de la halografía y la realidad virtual en contextos escolares contribuye a superar barreras sensitivas e intuitivas al modelar la estructura química de materiales y al referenciar conceptos abstractos ligados con las nanociencias. Estos autores citan que este tipo de tecnología favorece la interactividad, el diálogo, la participación y la construcción de aprendizajes significativos.

En resumen, las propuestas educativas descritas con anterioridad sugieren abordar la nanoquímica como una cuestión sociocientífica, es decir, como un campo de conocimientos con fuertes implicaciones sociales, tecnológicas, éticas y ambientales. Para ello, se debe tener en consideración los siguientes puntos: i) fomentar el dominio de los contenidos disciplinares en los que se fundamenta la nanoquímica, ii) promover el análisis de los riesgos e implicaciones socioambientales de los productos y desarrollos que tienen su origen en esta línea de investigación, y, iii) impulsar el pensamiento creativo, crítico y la innovación. Quedan aspectos adicionales por considerar como robustecer la formación de los profesores en esta área del conocimiento químico (sobre todo en el nivel bachillerato) y que los contenidos relacionados con la nanoquímica sean contemplados como relevantes por los especialistas e instituciones responsables de las reformas curriculares en materia de educación química.

La enseñanza de la nanoquímica bajo en el enfoque CTS-A

Tomando en cuenta los cursos y estrategias referenciadas en los párrafos anteriores, se propone que una forma de encauzar el abordaje de la nanoquímica en el nivel medio y superior es a través del enfoque ciencia, tecnología, sociedad y ambiente (CTS-A),² al constituir un marco educativo idóneo para dotar de coherencia y sentido los contenidos implicados. En el dominio de lo científico se pueden presentar los fundamentos que permiten explicar el comportamiento de la materia en la escala nanométrica y cómo las técnicas de síntesis agrupadas en la categoría *bottom-up* están modificando sustancialmente aspectos metodológicos e instrumentales de la química. En el rubro de lo tecnológico se sugiere comunicar cuestiones relacionadas con la amplia gama de aplicaciones que cubre la nanoquímica y aspectos relacionados con los sofisticados métodos espectroscópicos utilizados en la caracterización de nanomateriales. En este segundo apartado se recomienda incentivar el trabajo experimental, pues representa una parte sustancial en la enseñanza de todas las áreas de conocimiento químico. En el ámbito de lo social es posible abordar contenidos relacionados con el financiamiento, comercialización y gobernanza de la investigación nano. Finalmente, un elemento muy importante y al que no se le otorga la relevancia debida en las propuestas referenciadas con anterioridad es lo relacionado con la dimensión ambiental de la nanoquímica. Para cubrir este apartado, se propone, además, referenciar riesgos toxicológicos, diseñar actividades e instrumentos de evaluación basados en los diecisiete principios que la Organización de las Naciones Unidas asocia con el desarrollo sostenible (ONU, 2019). Esto con el objetivo de que los alumnos puedan indagar y valorar sobre qué tan sostenibles son las contribuciones que genera la nanoquímica.

La estructura de un curso de nanoquímica enraizado en el enfoque CTS-A puede estar organizado en cuatro módulos y culminar con la elaboración de proyectos de investigación encaminados a construir posibles soluciones a desafíos tecnológicos y ambientales en el ámbito local. Los módulos temáticos de esta propuesta son:

- Módulo 1. Introducción a la nanoquímica, conceptos y técnicas implicadas en la síntesis de nanomateriales.
- Módulo 2. Técnicas espectroscópicas y aplicaciones de la nanoquímica
- Módulo 3. Gobernanza de la nanoquímica y contribuciones al desarrollo sostenible
- Módulo 4. Desarrollo de proyectos de investigación y divulgación en nanoquímica

² El enfoque CTS-A es un movimiento educativo que surgió en la década de los años setenta y se consolidó a principios del presente siglo cuando aspectos relacionados con la historia,

Como en los cursos descritos con anterioridad, se sugiere su impartición a alumnos que posean conocimientos elementales sobre química, física y naturaleza de la ciencia. En el contexto mexicano podría ser impartido después de que los alumnos completen con éxito lo que se denomina tronco común en los centros y facultades donde se imparten licenciaturas afines con la química. El curso puede tener una duración de ocho o diez semanas, siendo los módulos de mayor duración el 1 y el 4 (los relacionados con el abordaje del marco conceptual de la nanoquímica y el desarrollo de proyectos de investigación). El nivel de profundidad de cada tema dependerá de los objetivos de aprendizaje y el perfil profesional que delimiten las instituciones educativas.

En el bachillerato se propone condensar y adecuar el contenido de los cuatro módulos al nivel cognitivo que revisten los estudiantes en este nivel de estudios. Asimismo, se sugiere que el abordaje de la nanoquímica se dé en el cierre de las asignaturas de química que tienen carácter propedéutico, es decir, que se imparten en las últimas etapas del bachillerato a estudiantes cuyo perfil vocacional está orientado hacia la química o las disciplinas científicas. El tiempo por módulo puede ajustarse a una semana, se recomienda sustituir el trabajo experimental y los proyectos de investigación por actividades más asequibles para los estudiantes como reportes de visitas guiadas a museos o centros de investigación donde la nanoquímica ocupe un lugar relevante, la elaboración de escritos cortos como reseñas o ensayos que contribuyan a enriquecer el periodismo científico en las instituciones de nivel medio, la preparación de trabajos y exposiciones en el marco de eventos o concursos locales que tienen como propósito robustecer la formación científica. La meta principal de articular el abordaje de la nanoquímica bajo el enfoque CTS-A en el bachillerato y nivel superior es formar ciudadanos científicamente cultos, responsables y comprometidos con su entorno.

Conclusiones

En el contexto educativo, el avance de la nanoquímica ha sido lento debido a la escasa o nula presencia de contenidos relacionados con esta área de conocimientos en los niveles de enseñanza obligatorios. Un problema que está asociado con la complejidad que revisten algunos contenidos presentes en su marco conceptual, así como por la serie de obstáculos epistemológicos que se han reportado en la literatura en los procesos de enseñanza y divulgación del mundo de lo nano (Serena, 2013; Sánchez-Mora y Tagüeña, 2011). Otro ele-

la filosofía y la naturaleza de la ciencia adquirieron relevancia en el ámbito educativo. Entre sus objetivos principales se encuentra la conceptualización de la ciencia como una actividad humana en construcción, desarrollar actividades y prácticas democráticas en torno a la investigación tecnológica, promover la construcción de puentes entre la cultura humanista y el pensamiento científico, vincular los procesos de enseñanza de la ciencia con el desarrollo sostenible, así como fomentar la toma de decisiones informadas en materia de ciencia y tecnología (Vilches *et al.*, 2011; Santos, 2019).

mento a considerar en torno a esta problemática es que las reformas curriculares suelen ser procesos lentos e independientes de los avances y las transformaciones que experimenta el conocimiento científico. No obstante, el pronunciado avance que ha tenido el campo de la nanoquímica en particular y de las nanociencias en general, invita a considerar como necesaria la inclusión de esta subdisciplina como un eje renovador de los currículos de química, sobre todo en los niveles medio y superior. Esto reeditarán en una actualización del proceso de enseñanza-aprendizaje de la denominada ciencia central, en la adquisición de una opinión crítica e informada sobre esta área de conocimientos en la ciudadanía y en la formación de vocaciones científicas en el campo.

En el ámbito universitario, el rezago en el tratamiento de aspectos relacionados con la nanoquímica es menor en comparación con lo descrito en la educación obligatoria. Prácticamente, la mayoría de las universidades en el mundo que imparten carreras científicas poseen grados y especializaciones que certifican los estudios en esta área. A pesar de ello, algunos expertos señalan como una dificultad en la enseñanza de la nanoquímica, la falta de homogeneidad en el tratamiento de contenidos, ausencia de estándares tanto de aprendizaje como de evaluación y la desarticulación de conocimientos disciplinares y contextuales (Jones y Blonder, 2013). Para afrontar estos problemas en Europa y EUA se están consolidando cursos intensivos en las etapas iniciales y de pregrado donde se fusionan actividades de lectura, diseño e impartición de conferencias, trabajo de capacitación en el laboratorio, análisis de implicaciones socioambientales, elaboración de artículos científicos y escenarios de debate (Ozin y Cademartiri, 2011; Pagliario, 2015).

Lo presentado en este artículo es una aportación con la intención de robustecer la discusión sobre la relevancia disciplinar de la nanoquímica y la necesidad de promover el trabajo educativo sobre este campo en todos los niveles de estudio. Por último, se puede aseverar que la inclusión de la nanoquímica como un elemento o eje renovador en la educación química en general es una cuestión loable y pertinente. Esto, si se toma en cuenta que actualizar, diversificar y mejorar la calidad de los procesos relacionados con la enseñanza-aprendizaje de la ciencia es una meta inherente de toda institución educativa.

Referencias

- Aegerter, M., Almeida, R., Soutar, A., Tadanaga, K., Yang, H. y Watanabe, T. (2008). Coatings made by sol-gel and chemical nanotechnology. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 47(2): 203-236.
- Aguiayo-González, F., Zarzuela Roldán, E. y Lama-Ruiz, J. (2011). Nanotecnología y nanoquímica. *Sevilla Técnica*, 36: 28-37. <http://hdl.handle.net/11441/38339>
- Alonso-Núñez, G. (2008). Nanoquímica: ingeniería de nanomateriales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 1(1): 45-50. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2008.1.53559>

- Álvarez-Amparán, M. y Cedeño-Caero, L. (2020). Análisis y relevancia de los procesos catalíticos para la remoción de azufre en los combustibles fósiles. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26): 51-71. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69633>
- Atkins, P. (2013). *What is chemistry?* UK: Oxford University Press.
- Bäuerle, D. (2013). *Laser processing and chemistry*. Springer Science & Business Media.
- Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M. y Rizzolio, F. (2020). The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical-physical applications to nanomedicine. *Molecules*, 25(1): 112. <https://doi.org/10.3390/molecules25010112>
- Bensaude-Vincent, B. (2004). Two cultures of nanotechnology?, *HYLE-International Journal for the Philosophy Chemistry*, 10(2): 65-82. https://doi.org/10.1142/9789812773975_0002
- Bolaños, L. y Álvarez, X. (2018). Polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos. *Revista de Ciencia y Tecnología, Revista de la Universidad de Costa Rica*, 34(1), 18-38.
- Bueno, O. (2004). The Drexler-Smalley debate on nanotechnology: incommensurability at work? *HYLE-International Journal for the Philosophy Chemistry*, 10(2): 65-82. https://doi.org/10.1142/9789812773975_0003
- Camacho, B. A., Martínez, O., Arenas, M., Argueta, L., de la Fuente, J. y Acosta, L. S. (2015). Copper: Synthesis techniques in nanoscale and powerful application as an antimicrobial agent. *Journal of Nanomaterials*, ID 415238, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/415238>
- Castro, E., García, A. H., Zavala, G. y Echegoyen, L. (2017). Fullerenes in biology and medicine. *Journal of Materials Chemistry B*, 5(32), 6523-6535. <https://doi.org/10.1039/C7TB00855D>
- Contreras, R. y Cardozo, E. (2015). Conceptos de nanoquímica. En Laréz-Velásquez, C., Koteich-Katib, S. y López-González, F. (eds.), *Nanotecnología: fundamentos y aplicaciones*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.
- Cruz-Alonso, M., Fernández, B., García, M., González-Iglesias, H. y Pereiro, R. (2018). Quantitative imaging of specific proteins in the human retina by laser ablation ICPMS using bioconjugated metal nanoclusters as labels. *Analytical chemistry*, 90(20): 12145-12151. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b03124>
- De Jong, K. P. (2009). *Synthesis of solid catalysts*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Delgado, G. C. (2011). Implicaciones éticas, economicosociales y legales de la nanomedicina: el caso de México. En Arnaldi, Simone, Delgado, Gian Carlo, Piccinini, Mariassunta, Poletti, Piera (eds.), *Nanomedicina. Entre políticas públicas y necesidades privadas*. CEIICH, UNAM/CIGA, Universidad de Padua. México: 67-112.
- Delgado, G. C., y Magaña, E. L. (2012). Diálogo para el avance científico y tecnológico a la nanoescala. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 5(1):82-102. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45168>
- Díaz, G. (2011). Catálisis y nanocatálisis. En Takeuchi, N. (ed.), *Nanociencia y nanotecnología. Panorama actual en México*. México: CEIICH-UNAM, 43-63.

- Escobar-Alarcón, L. y Solís-Casados, D. (2020). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO_2 en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 14(26), 11-33. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Feynman, R. P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science magazine (Caltech)*, 23: 22-36.
- Fesenko, O. y Yatsenko, L. (2018). *Nanochemistry, biotechnology, nanomaterials, and their applications*. Springer International Publishing.
- Foladori, G. y Invernizzi, N. (2018). A critical vision of disruptive nanotechnologies. *Perspectives on Global Development and Technology*, 17(5-6): 614-631. <https://doi.org/10.1163/15691497-12341497>
- García-Betancourt, M. (2017). Perspectivas para la innovación en educación con nanociencia y nanotecnología. *Revista de educación y desarrollo*, 41: 93-101. Universidad de Guadalajara.
- García, A. (2012). Aprendiendo del futuro: gobernando la nanotecnología. *CTS: Revista iberoamericana de ciencia, tecnología y sociedad*, 7(20), 261-272.
- García, N. G. (2013). Electrospinning: una técnica fascinante para la obtención de nanofibras poliméricas. *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, (677): 166-173.
- Isaza, A., Patiño, S., Arango, E. y Rave, N. (2019). Sistema de protección térmica basado en polímeros reforzados con nanotubos de carbono y dióxido de titanio para aplicaciones industriales. *Materiales Compuestos*, 3(4): 11-16.
- Jones, M., Blonder, R., Gardner, G., Albe, V., Falvo, M. y Chevrier, J. (2013). Nanotechnology and nanoscale science: educational challenges. *International Journal of Science Education*, 35 (9): 1490-1512. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.771828>
- Kaplan, S. y Radin, J. (2011). Bounding an emerging technology: Para-scientific media and the Drexler-Smalley debate about nanotechnology. *Social Studies of Science*, 41(4): 457-485. <https://doi.org/10.1177/03063127111402722>
- Karousis, N., Tagmatarchis, N. y Tasis, D. (2010). Current progress on the chemical modification of carbon nanotubes. *Chemical reviews*, 110(9): 5366-5397. <https://doi.org/10.1021/cr100018g>
- López-Quintela, M. (2015). Nanoquímica: una verdadera revolución científico-tecnológica. *Panorama social*, (21): 39-50.
- Martín, N. (2011). Sobre fullerenos, nanotubos de carbono y grafenos. *Arbor*, 187(Extra_1): 115-131. <https://doi.org/10.3989/arbor.2011.extran1117>
- Martín, J., Camacho, M. y Vega, J. (2013). Influencia de las nanopartículas de sílice en polímeros termoplásticos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 6(11): 40-51. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.11.50003>
- Meinguer, J. (2018). El valor del pensamiento crítico en la educación científica. *Eutopía*, 11(29): 5-11. CCH-UNAM.
- Meinguer, J. (2019). La comunicación de la nanotecnología a través del análisis crítico de textos informales. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotec-*

- nología, 12(22): 3-35. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.61953>
- Meinguer, J. y Pérez, M.C. (2021). Desarrollo y evaluación de elementos de pensamiento crítico sobre la química verde en el bachillerato. *Investigación en la Escuela*, 103: 106-124. <https://doi.org/10.12795/IE.2021.i103.08>
- Munuce, A. (2014). Biografía no autorizada de las nanopartículas. En Silvestri, S., Munuce, A. y Alassia, M., Seferian, A., Reviglio A. y Soria, L., *Nanotecnología hoy: el desafío de conocer y enseñar*. Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación, 41-63.
- Nevárez-Martínez, M., Espinoza-Montero, P., Quiroz-Chávez, F. y Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*, 12(2-3): 45-59.
- ONU (2019). *Informe Mundial sobre el Desarrollo Sostenible 2019: El futuro es ahora—la ciencia al servicio del desarrollo sostenible—*. Grupo independiente de científicos designados por el secretario general. Naciones Unidas.
- Ozin, G. y Cademartiri, L. (2011). From ideas to innovation: nanochemistry as a case study. *Small*, 7(1): 49-54. <https://doi.org/10.1002/sml.201001097>
- Ozin, G. y Arsenault, A. (2015). *Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials*. UK: Royal Society of Chemistry Publishing.
- Palma, M., Acuña, R., Acosta, G. y Padrón, G. (2010). Estado del arte del proceso sol-gel en México. *CIENCIA ergo-sum*, 17(2): 183-188.
- Pagliaro, M. (2015). Advancing nanochemistry education. *Chemistry—A European Journal*, 21(34): 11931-11936. <https://doi.org/10.1002/chem.201501042>
- Pyrrho, M., y Schramm, F. R. (2019). Cruces entre salud colectiva y bioética: la nanotecnología como objeto-modelo. *Revista Bioética*, 27(4): 587-594. <https://doi.org/10.1590/1983-80422019274341>
- Reviglio, A. 2014. Por qué y para qué enseñar nanotecnología en las escuelas. En Silvestri, S., Munuce, A. y Alassia, M., Seferian, A., Reviglio A. y Soria, L., *Nanotecnología hoy: el desafío de conocer y enseñar*. Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación, 159-183.
- Ribeiro, A., Godoy, G., Neto, L. y de Souza-Filho, M. (2018). Holografía y realidad virtual en la enseñanza de nanotecnología: nuevos horizontes dirigidos a educación secundaria. *MOMENTO*, (56E): 34-45. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/71645>
- Ribeiro, A. y de Souza-Filho, M. (2014). Proyecto de ambientes innovadores de enseñanza y la propuesta del laboratorio de formación interdisciplinar de educadores en nanociencia y nanotecnología-LIFENano/IFSP. *MOMENTO*, (49E): 38-48. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/67391>
- Rojas, M. (2015). *Diseño y síntesis de materiales “a medida” mediante el método sol-gel*. Madrid: UNED.
- Saldívar, L. (2021). 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>
- Santos, R. y Auler, D. (2019). Práticas educativas CTS: busca de uma participação

social para além da avaliação de impactos da Ciência-Tecnologia na Sociedade. *Ciência & Educação (Bauru)*, 25(2): 485-503. <https://doi.org/10.1590/1516-731320190020013>

Sánchez-Mora, C. y Tagüeña, J. 2011. El manejo de las escalas como obstáculo epistemológico en la divulgación de la nanociencia. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 4(2): 83-102. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2011.2.45011>

Sebastián, V. (2018). Nanocristales, nuevos materiales con propiedades y aplicaciones únicas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26(3): 306-314. <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/343169>

Serena, P. 2013. Acercando la nanotecnología a la sociedad: la exposición un paseo por el nanomundo. *Revista Digital Universitaria*, 14 (4). <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num4/art29/index.html>

Serena, P., Giraldo, N., Takeuchi, N. y Tutor J. (2014). *Guía didáctica para la enseñanza de la nanotecnología en la educación secundaria*. Madrid: nanoDYF. <https://cutt.ly/qcCRR3M>

Strand, Roger y Nydal, Rune. (2008). Nanoética buena–nanotecnología buena. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria de Nanociencia y Nanotecnología*, 1(1): 61-79. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2008.1.53562>

Takeuchi, N. (2011). *Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mundo mejor átomo por átomo*. México: FCE-UNAM.

Vilches, A., Gil, D. y Paia, J. (2011). De CTS a CTSA: Educación por un futuro sostenible. En Pereira., W y Auler, D. (coords.), *CTS e educação científica: desafios, tendências e resultados de pesquisa*. Brasil: Universidade de Brasília, 185-209.

Zanella, R. (2012). Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 5(1),69-80. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2012.1.45167>

Gobernanza de la nanomedicina: una revisión sistemática

Nanomedicine governance: a systematic review

Roberto Soto-Vazquez,*[†] Edgar Záyago Lau,** Luis Alfonso Maldonado López***

ABSTRACT: Nanomedicine bears essential benefits from both medical and technical perspectives. However, there are toxicological, environmental, ethical, and social implications worth researching. Governance encompasses, among other things, the management of risks and benefits of new technologies to minimize risk and, presumably, increasing benefits. This paper aims to show an overview of nanomedicine governance through a systematic review of scientific literature. The methodology consisted of five steps: 1) searching for papers in Scopus, Web of Science and SciELO; 2) cleaning results; 3) gathering altmetrics from Dimensions; 4) reviewing papers, and, 5) critical analysis of the papers. We identified certain regulatory deficiencies and ethical issues related to nanomedical products. There has been an advance in researching threats to health and the environment from nanomedical applications, but there are still gaps in regulation.

KEYWORDS: nanomedicine, governance, regulation, risks, ethical issues.

RESUMEN: La nanomedicina (la aplicación de la nanotecnología en medicina) está revolucionando el diagnóstico, tratamiento y control de enfermedades. Aunque es cierto que esta ha generado importantes beneficios desde el punto de vista médico, existen riesgos toxicológicos, ambientales, éticos y sociales que deben ser analizados. La gobernanza, entre otras cosas, abarca la gestión de riesgos y beneficios de las nuevas tecnologías, por lo que puede aplicarse en nanomedicina para el análisis de riesgos. El objetivo de este artículo es mostrar un panorama de la gobernanza de la nanomedicina a través de una revisión sistemática de la literatura científica. La metodología empleada consistió en los siguientes pasos: 1) búsqueda de artículos en las bases de datos de Scopus, Web of Science y SciELO; 2) limpieza de resultados; 3) obtención de datos altmétricos de la plataforma Dimensions; 4) descarga y lectura de los artículos, y, 5) análisis crítico de los artículos. Como resultado se identificaron deficiencias regulatorias y preocupaciones éticas vinculadas con los productos nanomédicos, pero también se encontraron propuestas para evaluar riesgos y abordar aspectos éticos. Se concluye que, aunque ha habido progresos en la evaluación de riesgos, aún existen asuntos pendientes en materia de regulación.

PALABRAS CLAVE: nanomedicina, gobernanza, regulación, riesgos, aspectos éticos.

Introducción

Desde hace dos décadas, la nanotecnología se ha involucrado en el sector médico para propiciar mejoras en el diagnóstico, monitoreo, control, prevención

Recibido: 1 de junio, 2021. Aceptado: 9 de agosto, 2021. Publicado: 17 de septiembre, 2021.

* Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN)-Unidad Zacatenco. México.

** Universidad Autónoma de Zacatecas-Unidad Académica en Estudios del Desarrollo. México.

*** Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN)-Unidad Mérida. México.

[†] Autor de correspondencia: roberto.soto@cinvestav.mx



y tratamiento de enfermedades a través del uso de nanomateriales. Esta vinculación entre nanotecnología y medicina ha dado lugar al surgimiento de un nuevo campo disciplinario denominado nanomedicina. Las áreas del sector médico donde la nanomedicina ha tenido mayor repercusión son la administración de fármacos, la terapia, el diagnóstico y los biomateriales.

En la administración de fármacos se han empleado nanoestructuras como liposomas, dendrímeros, fulerenos y nanopartículas poliméricas para transportar medicamentos a partes específicas del cuerpo humano. El uso de estos nanotransportadores ofrece importantes ventajas con respecto a los métodos convencionales de administración de fármacos. Debido a su tamaño, los nanotransportadores pueden atravesar barreras biológicas y fisiológicas que normalmente son impermeables para estructuras más grandes, lo cual redundaría en una mayor eficacia en la entrega de los fármacos (Rana y Sharma, 2019). Otra ventaja es que, mediante la manipulación de sus propiedades superficiales, los nanotransportadores pueden ser dirigidos específicamente a los órganos y tejidos enfermos; de esta manera, se reducen los efectos secundarios debidos a la propagación de los fármacos en tejidos sanos. Estas ventajas se han aprovechado en el desarrollo de nuevos tratamientos contra el cáncer donde se utilizan nanotransportadores para enviar los fármacos directamente a los tumores cancerosos (Meel R. van der *et al.*, 2019). Si bien es cierto que la administración de fármacos mediada por nanotransportadores se ha enfocado principalmente en el desarrollo de tratamientos contra el cáncer, también existe potencial para aplicar esta tecnología en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 1, infecciones fúngicas, linfomas o leucemias, así como enfermedades que afectan partes del cuerpo poco accesibles como el cerebro y los ojos (Caracciolo, 2015). Los nanotransportadores más empleados en la administración de fármacos son los liposomas, y actualmente existen en el mercado varios fármacos liposomales como, por ejemplo: Doxil®, Myocet®, DaunoXom®, Onivyde®, Marqibo®, entre muchos otros (Gadekar *et al.*, 2021).

La nanomedicina también ha incidido en la mejora y en el desarrollo de nuevas terapias médicas tales como la hipertermia magnética y la terapia fotodinámica. La hipertermia magnética es una terapia contra el cáncer que se basa en la capacidad de las nanopartículas magnéticas para generar calor cuando se exponen a un campo magnético (Lemine, 2019). En este tipo de terapia, al paciente se le administran nanopartículas magnéticas que se dirigen específicamente al tumor canceroso. Una vez que las nanopartículas llegan al tumor, se aplica un campo magnético para provocar el movimiento de las nanopartículas dentro del tumor. El calor que se produce por este movimiento altera la fisiología de las células enfermas e induce su apoptosis (muerte celular). Por otra parte, la terapia fotodinámica también provoca la apoptosis de las células enfermas, pero lo hace a través de sustancias fotosensibilizadoras que se activan con la irradiación de luz. En este tipo de terapia, la nanomedicina ha contribuido con el desarrollo de nanotransportadores para dirigir las sustancias fotosensibilizadoras a las células enfermas (Kim, Jo y Na, 2020).

Otra área donde la nanomedicina ha hecho importantes contribuciones es el diagnóstico de enfermedades, principalmente en la optimización de técnicas de imagenología y en el desarrollo de biosensores para diagnósticos *in vitro*. La imagenología es una técnica de diagnóstico consistente en la observación directa de los órganos y tejidos del paciente, a través de distintas técnicas de obtención de imágenes tales como rayos X, tomografías computarizadas y resonancia magnética. En este rubro, la nanomedicina ha introducido el uso de nanopartículas como agentes de contraste para mejorar la resolución de las imágenes (Li *et al.*, 2016). Lo anterior es muy importante por posibilitar la detección de tumores y otras enfermedades en etapas muy tempranas. Por otra parte, los diagnósticos *in vitro* consisten en la extracción de muestras del paciente, ya sean de fluidos corporales o de algún tejido, para su posterior análisis en laboratorio. La utilización de biosensores nanoestructurados en el análisis de las muestras de los pacientes tiene importantes ventajas: se requieren muestras más pequeñas, se logra una mayor selectividad de los compuestos de interés y los diagnósticos son más rápidos. Un ejemplo reciente de innovación en este tema es el diseño de nanobiosensores para la detección del virus SARS-CoV-2 (Funari, Chu y Shen, 2020; Qiu *et al.*, 2020).

En lo que respecta al área de biomateriales, la nanomedicina ha contribuido en el desarrollo de recubrimientos a base de nanopartículas que se aplican en los implantes médicos para mejorar su biocompatibilidad y prolongar su vida útil (Basova *et al.*, 2021). Asimismo, existen nanomateriales con propiedades bactericidas y antivirales utilizadas en la manufactura de productos médicos. El ejemplo más emblemático de esto son las nanopartículas de plata, cuyas propiedades bactericidas se han aprovechado en la fabricación de apósitos para heridas, dispositivos anticonceptivos, instrumentos quirúrgicos e implantes ortopédicos (Chen y Schluesener, 2008). Otro nanomaterial que recientemente ha llamado la atención por sus propiedades antivirales son las nanopartículas de cobre, las cuales podrían utilizarse en el desarrollo de equipos de protección personal frente al virus SARS-CoV-2 (Sportelli *et al.*, 2020).

Lo precedente ilustra a grandes rasgos las posibilidades de los beneficios de la nanomedicina; sin embargo, existen desafíos importantes en cuanto a la seguridad, regulación y aspectos éticos que debemos considerar. Aún no se conocen con total certeza los posibles efectos toxicológicos de los productos nanomédicos en el ser humano (Khare, Saxena y Gupta, 2015). Tampoco se cuenta con regulaciones adecuadas para normar la fabricación, control de calidad, seguridad y evaluación de la eficacia de estos productos (Zhang *et al.*, 2020). Además, existen preocupaciones éticas relacionadas con la gestión de los riesgos toxicológicos, equidad en el acceso a los productos nanomédicos, protección de la información médica de los pacientes y transhumanismo (mejoramiento de las capacidades físicas e intelectuales de los humanos mediante el uso de la tecnología) (Graur *et al.*, 2011; Bawa y Johnson, 2020).

En diversos espacios se avanza en la gobernanza como un mecanismo de orden normativo que pudiera coadyuvar a direccionar la trayectoria de ciertas tecnologías y sus desafíos. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define la gobernanza tecnológica como el proceso de ejercer la autoridad política, económica y administrativa en el desarrollo, difusión y funcionamiento de la tecnología en las sociedades (OCDE, S. f.). El propósito de la gobernanza es gestionar los riesgos y beneficios de la tecnología, es decir, aprovechar sus bondades, al mismo tiempo de prevenir o mitigar sus posibles efectos negativos. En este proceso, idealmente, no solo participan agentes gubernamentales, sino que también colaboran empresarios, científicos y representantes de la sociedad civil. Al mismo tiempo, es en este espacio en el que interactúan fuerzas de distintos niveles, ya sean locales, nacionales, regionales o de corte internacional. La gobernanza como instrumento de política pública, que se explicita en la norma y el orden jurídico, permite la participación y el fortalecimiento de los esquemas de protección social con el objetivo de equilibrar los distintos poderes e intereses de los agentes o participantes que interactúan (Pierre y Peters, 2000). La integración de las economías a nivel mundial, *vis à vis* la globalización, implica dificultades y retos para la mediación de los derechos en el espacio nacional, la participación de la autoridad y los derechos de los actores sociales, políticos y económicos; lo cual genera configuraciones “desnacionalizadas” que operan en el espacio subnacional, nacional o global (Sassen, 2013: 507). En este orden de ideas, Ocampo (2015) discute que la gobernanza, como marco institucional para la interacción de actores o grupos intergubernamentales, es conductora y reproductora de tres fenómenos diferenciadores: i) la concentración en pocos países del progreso tecnológico y productivo; ii) acumulación de recursos financieros (por la configuración del sistema monetario), y, iii) la movilidad y la conquista de factores de producción (Ocampo, 2015: 36). La gobernanza es, pues, un instrumento coadyuvante en la socialización del beneficio tecnológico y la disminución de los riesgos o aspectos no deseados.

En términos de la regulación de las tecnologías, la gobernanza se manifiesta a partir de las declaraciones y pronunciamientos que influyen en la discusión y la reglamentación; esto incluye desde luego a la nanotecnología (Foladori, 2009).

El enfoque de gobernanza se ha utilizado para analizar algunos aspectos de la nanotecnología, tales como la evaluación y gestión de riesgos (Renn y Roco, 2006), la regulación (Foladori, 2009; Saldivar-Tanaka, 2019), y el financiamiento a las actividades de investigación e innovación (Anzaldo, Chauvet y Maldonado, 2014). Si bien es cierto que la gobernanza de la nanotecnología abarca algunos puntos aplicables a la nanomedicina, esta última tiene sus propios desafíos de gobernanza que merecen un estudio aparte. A diferencia de otras áreas, la nanomedicina implica la exposición humana intencional a los nanomateriales, lo cual plantea desafíos específicos para este campo (Bhatia y Chugh, 2017).

A nivel internacional se han hecho algunos esfuerzos en materia de gobernanza para enfrentar los desafíos éticos, regulatorios y de riesgos que plantean la nanotecnología y la nanomedicina. En 2012, se celebró una reunión de expertos de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) sobre el tema de nanotecnología y salud humana, y la discusión se centró en cuatro áreas: a) evaluación de la exposición de nanomateriales; b) nanotoxicología; c) evaluación de riesgos, y, d) regulación y gobernanza de riesgos (WHO, 2013). En este mismo sentido, la OCDE y Grupo Allianz (S. f.) han señalado la necesidad de incrementar el financiamiento a la investigación de riesgos de los nanomateriales. Por otra parte, la Comisión Europea ha establecido grupos de trabajo que han hecho contribuciones a la gobernanza de la nanomedicina; por ejemplo, el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (SCENIHR, por sus siglas en inglés) elaboró una guía para evaluar los riesgos de los nanomateriales utilizados en dispositivos médicos (SCENIHR, 2015), y el Grupo Europeo de Ética de la Ciencia y las Nuevas Tecnologías (EGE, por sus siglas en inglés) emitió un documento de opinión sobre las preocupaciones éticas derivadas de la nanomedicina (EGE, 2007). Otra iniciativa emanada de la Comisión Europea es el EU NanoSafety Cluster, cuyo propósito es maximizar la sinergia entre los proyectos de investigación que se llevan a cabo en Europa en torno a la seguridad de los nanomateriales (EU NanoSafety Cluster, S. f.).

El objetivo de este artículo es destacar la relevancia de la gobernanza de la nanomedicina mediante una revisión sistemática de los artículos publicados sobre el tema a nivel internacional.

Metodología

La búsqueda de los artículos para la revisión de la literatura se realizó en tres bases de datos: Web of Science (WoS), Scopus y SciELO. Se eligieron WoS y Scopus por ser las bases de datos bibliográficas más relevantes a nivel mundial (Zhu y Liu, 2020); no obstante, su contenido está principalmente en inglés. Para abarcar publicaciones en otros idiomas como español y portugués, se incluyó en la estrategia de búsqueda la base de datos SciELO, al enfocarse esta en la producción científica de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

Para determinar los términos clave a utilizar, primero se llevó a cabo una búsqueda preliminar con los términos *governance* y *nanomedicine*. Se encontró que las publicaciones sobre gobernanza de la nanomedicina abordan temas de regulación, riesgos y ética; por lo tanto, se añadieron los términos *risks*, *regulation* y *ethics*. Después se agregaron los términos *nanotechnology*, *medicine* y *medical*, con el propósito de abarcar otras denominaciones con las que se identifica la nanomedicina, como lo son, por ejemplo: *nanotechnology in medicine*; *nanotechnology in medical applications*; *nanotechnology for medical purposes*, entre otros. Todos estos términos se enlazaron por medio de operadores booleanos para construir cadenas de búsqueda, las cuales se muestran en la tabla 1. En las tres

bases de datos se realizaron búsquedas en modo avanzado. En WoS y Scopus se especificaron los siguientes parámetros: a) tipo de documento: artículo; b) idioma: todos; c) periodo: todos los años. En SciELO no se especificó ningún parámetro.

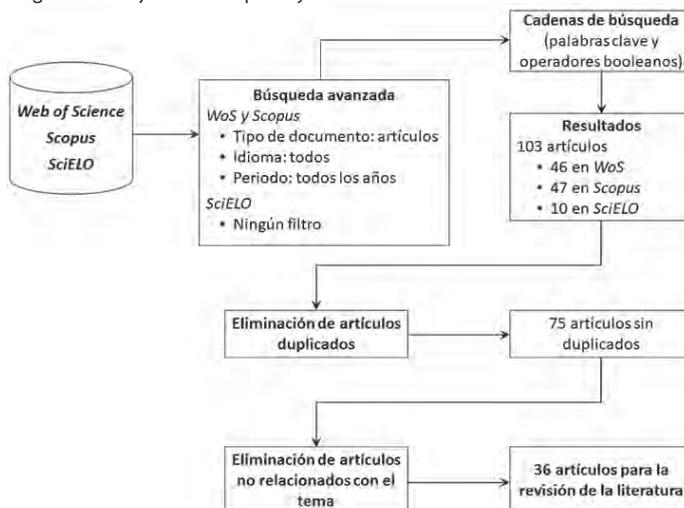
TABLA 1. Cadenas de palabras clave utilizadas en la búsqueda de artículos.

Base de datos	Cadenas de búsqueda
WoS	TS=(governance AND (nanomedicine* OR (nanotechnology NEAR (medicine OR medical)))) OR TI=((risks OR regulation OR ethics) AND (nanomedicine* OR (nanotechnology NEAR (medicine OR medical))))
Scopus	(TITLE-ABS-KEY(governance AND (nanomedicine* OR (nanotechnology W/15 (medicine OR medical)))) OR TITLE((risks OR regulation OR ethics) AND (nanomedicine* OR (nanotechnology W/15 (medicine OR medical)))) AND DOCTYPE(ar)
SciELO	(governance OR risks OR regulation OR ethics) AND (nanomedicine* OR (nanotechnology NEAR (medicine OR medical)))

Fuente: Elaboración de los autores.

La búsqueda se realizó en julio de 2021 y produjo 103 resultados (46 en WoS, 47 en Scopus y 10 en SciELO). Después de eliminar los artículos repetidos y descartar aquellos que no estaban relacionados directamente con la gobernanza de la nanomedicina, se obtuvieron 36 artículos para llevar a cabo la revisión de la literatura. En la figura 1 se resume la metodología empleada en la búsqueda y filtrado de artículos.

FIGURA 1. Diagrama de flujo de la búsqueda y filtrado de artículos.



Fuente: Elaboración de los autores.

Los 36 artículos seleccionados se rastrearon en la plataforma Dimensions (www.dimensions.ai) para conocer el impacto obtenido en cuanto a número de citas y presencia en Internet.

Resultados y discusión

Los artículos se clasificaron en cuatro rubros: aspectos generales de gobernanza, regulación, ética y riesgos. Las tablas 2, 3, 4 y 5 reúnen los artículos de cada una de estas cuatro áreas, respectivamente. Las tablas muestran la referencia de los artículos, los países de los autores de correspondencia y los principales hallazgos o contribuciones. También se incluyen dos parámetros de Dimensions: “total de citas” y “nivel de atención Altmetrics”. El primer parámetro indica el número de veces que un artículo ha sido citado en todas las publicaciones indexadas en Dimensions; el segundo es un valor que muestra la cantidad de atención que ha recibido un artículo en Internet, es decir, menciones en blogs, Wikipedia, redes sociales como Reddit, Twitter y Facebook, etc. En cada tabla los artículos están ordenados de forma cronológica, del más antiguo al más reciente.

TABLA 2. Artículos sobre aspectos generales de gobernanza.

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
Nerlich, Clarke y Ulph (2007)	Reino Unido	Se indaga la percepción que tienen los adultos jóvenes sobre los riesgos y beneficios de la nanomedicina. Hay una mejor percepción hacia los tratamientos de una sola dosis. Los hombres muestran una actitud más favorable hacia la nanomedicina que las mujeres.	18	8
Sandler (2009)	Estados Unidos	Los problemas de la nanomedicina no se restringen únicamente a cuestiones de riesgos y justicia distributiva; también existen problemas éticos, sociales y legales que tienen que considerarse.	14	-
Vivekanandan (2009)	India	Los principales desafíos de gobernanza que enfrenta la nanomedicina en India son la poca vinculación entre centros de investigación y empresas, financiamiento limitado, escasa participación del sector privado, poco interés en la investigación de riesgos, entre otros.	2	-
de Cózar Escalante (2012)	España	Se identifican cuestiones relacionadas con la nanomedicina y nanobiotecnología que deben analizarse desde las ciencias sociales: gestión de riesgos, transferencia tecnológica, bioética, biopolítica y sostenibilidad.	-	-
Giroto Carelli Hermes y Haidamus de Oliveira Basto (2014)	Brasil	Se analizan algunos logros de la nanomedicina en Brasil hasta el año 2013 y se exploran sus implicaciones éticas, toxicológicas y ambientales.	-	-

Fuente: Elaboración de los autores.

TABLA 3. Artículos sobre regulación.

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
De Ville (2008)	Estados Unidos	Se propone la creación de un registro obligatorio para recabar datos sobre la seguridad y eficacia de los productos nanomédicos que ya se encuentran en el mercado. El objetivo es rastrear la experiencia de los usuarios para evitar riesgos.	6	-
Chowdhury (2010)	Países Bajos	Se plantea que la regulación de los productos nanomédicos en la Unión Europea podría guiarse de la normatividad a medicamentos pediátricos y de terapia avanzada para abordar asuntos de farmacovigilancia.	15	-
Marchant <i>et al.</i> (2010)	Estados Unidos	No hay tratados internacionales sobre regulación de la nanomedicina, pero existen algunas iniciativas informales que promueven la cooperación internacional en este tema.	13	-
Anand, Srivastava y Sarma (2011)	India	Se proponen algunas acciones para fortalecer la regulación de la nanomedicina en India, por ejemplo, el diseño y adopción de estándares voluntarios en la industria nanomédica y el establecimiento de normas locales con el apoyo de organismos internacionales.	2	-
Altenstetter, 2011	Estados Unidos	Se enfatiza que la seguridad de los pacientes debe ser un asunto a considerarse durante todo el ciclo regulatorio de la nanomedicina, desde la evaluación clínica y los controles previos a la comercialización hasta el uso final de los productos nanomédicos en diversos entornos clínicos.	8	-
Dorbeck-Jung y Chowdhury, 2011	Países Bajos	Hay deficiencias en la regulación de la nanomedicina en la Unión Europea, por ejemplo, falta de definiciones claras respecto a los productos nanomédicos, limitaciones en los estándares de seguridad, calidad y eficacia, y dificultades en la evaluación de impactos ambientales.	16	-
Wolf y Jones, 2011	Estados Unidos	Ante los riesgos que implica la investigación nanomédica en seres humanos, se propone la creación de una agencia que vigile y regule estas actividades.	11	4
D'Silva, Robinson y Shelley-Egan (2012)	Países Bajos	La incertidumbre en el marco regulatorio de la nanomedicina no ha inhibido la inversión en este sector. Esto se debe que las distintas partes involucradas (empresas, organizaciones no gubernamentales, grupos de usuarios) han desarrollado mecanismos alternativos de regulación tales como códigos de conducta, estándares voluntarios y procedimientos de vigilancia.	3	1
Gispert (2012)	España	Se propone utilizar el principio precautorio como una guía en la regulación de productos nanomédicos en la Unión Europea.	3	-

Continúa ►

TABLA 3. Artículos sobre regulación. (Continuación)

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
Delgado Ramos y Hernández Burciaga (2013)	México	Se revisan los avances científicos en nanomedicina aplicada al cáncer cerebral y se propone un modelo normativo para la gestión de riesgos en nanomedicina que abarca aspectos éticos y sociales.	-	-
Andorno y Biller-Andorno (2014)	Suiza	Se enfatiza la importancia de adoptar el principio precautorio en la regulación de la nanomedicina para prevenir daños potenciales relacionados con los productos nanomédicos.	3	-
Cancino, Marangoni y Zucolotto (2014)	Brasil	Brasil tiene un importante potencial para el desarrollo y comercialización de productos nanomédicos, pero carece de estándares y regulaciones adecuadas para este sector.	9	3
Bawa (2016)	Estados Unidos	En lo que respecta a nanotecnología y nanomedicina, el marco regulatorio de la FDA tiene definiciones poco claras de lo que es nano. Se propone una nueva definición de nanotecnología que es más adecuada para el ámbito regulatorio.	-	-
Vidal Correa (2016)	México	Se comparan las regulaciones de Estados Unidos y la Unión Europea en materia de nanotecnología y nanomedicina. Se concluye que la normatividad de sustancias químicas es limitada para abarcar lo nano, y que la normatividad para medicamentos y productos sanitarios presenta deficiencias en cuanto a la clasificación de los productos nanomédicos.	-	-
Rahim (2019)	Australia	Ante la falta de un marco normativo específico para la nanomedicina en Australia, se propone adoptar un enfoque de metarregulación en el que las empresas se regulen a sí mismas bajo la supervisión del Estado.	-	-

Fuente: Elaboración de los autores.

TABLA 4. Artículos sobre ética.

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
Khushf (2007)	Estados Unidos	Se analizan cuestiones éticas de la nanomedicina relacionadas con la propiedad intelectual, consentimiento informado, relación médico-paciente y medicina personalizada.	16	-
Resnik y Tinkle (2007)	Estados Unidos	Hasta 2007, las preocupaciones éticas sobre nanomedicina se orientaban principalmente a la evaluación, gestión y comunicación de riesgos. Se pronostica que a futuro aumenten las preocupaciones éticas en torno a justicia social, acceso a la atención médica y transhumanismo.	71	-

Continúa ►

TABLA 4. Artículos sobre ética. (Continuación)

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
Bawa y Johnson (2009)	Estados Unidos	Se discuten aspectos de la nanomedicina que despiertan preocupaciones éticas, por ejemplo, riesgos toxicológicos de los nanomateriales, inequidad en el acceso a productos nanomédicos y concentración de patentes en unas pocas empresas multinacionales.	29	-
Álvarez-Díaz (2011)	México	Partiendo de la bioética, se analizan algunas preocupaciones derivadas de la nanomedicina tales como el consentimiento informado y la inequidad en el acceso a los productos nanomédicos.	-	-
Kimmelman (2012)	Canadá	Se propone un modelo ético de investigación clínica para prevenir externalidades negativas (perjuicios a terceros) tales como daños a trabajadores por exposición a nanomateriales o contaminación del medio ambiente.	5	-
Haker (2013)	Estados Unidos	El enfoque ELSA (ethical, legal and social aspects) se ha usado para evaluar las implicaciones éticas, jurídicas y sociales de tecnologías emergentes como la genómica. Se propone aplicar el enfoque ELSA en nanomedicina, integrando el análisis de riesgos de nanomateriales en la parte ética.	-	-
Ganau et al. (2016)	Estados Unidos	Se propone un marco ético para informar a los usuarios finales los beneficios y posibles riesgos de los productos nanomédicos.	-	-
Evans, McNamee y Guy (2017)	Reino Unido	Se identifican algunas preocupaciones éticas asociadas con el uso de nanobiosensores en los deportes, entre las que se encuentran el mal manejo de datos, efectos de los nanomateriales en la salud de los atletas y problemas de inequidad en el deporte.	7	9
Lima-Dora, Teixeira-Primo y de-Moraes-Soares-Araújo (2019)	Brasil	Ante la incipiente regulación del sector nanomédico en Brasil, se hace una reflexión bioética sobre los posibles riesgos a la salud y medio ambiente de los nanomedicamentos. Se plantea la adopción del principio precautorio en el sector nanomédico y la aplicación de un enfoque transdisciplinario en la formulación de los marcos normativos.	-	-

Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 2A se observa la distribución porcentual de los artículos por tema. La regulación es el tema que concentra la mayor cantidad de artículos (41.67 %), seguido por ética (25%), riesgos (19.44 %) y, finalmente, aspectos generales de gobernanza (13.89%). En la figura 2B se presenta la distribución porcentual de los artículos por país. Se distinguen tres regiones prominentes en publicaciones: América anglosajona (color naranja), Unión Europea (azul) y América Latina (verde). Actualmente, Reino Unido no forma parte de la Unión Europea, pero en este análisis se le considera dentro de ella porque todos sus artículos son

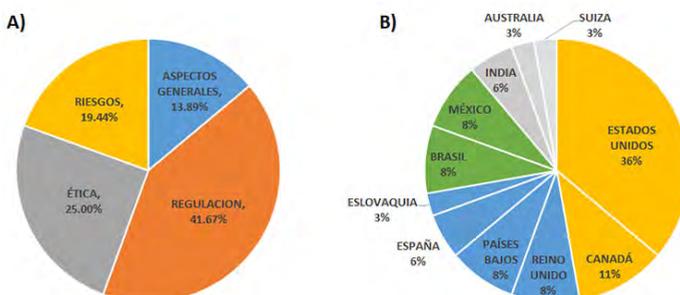
TABLA 5. Artículos sobre riesgos.

Referencia	País	Principales hallazgos / contribuciones	Total de citas	Nivel de atención Altmetrics
Reilly (2007)	Canadá	Se explora el potencial que tienen los nanotubos de carbono para usarse como transportadores de radiofármacos en tratamientos de medicina nuclear, pero también se analizan los posibles riesgos toxicológicos de estas nanoestructuras	72	-
Tyshenko (2008)	Canadá	Se exploran los posibles riesgos toxicológicos del uso de material genético a nanoescala en sistemas de administración de fármacos.	4	-
Hogle (2012)	Estados Unidos	Se recomienda la creación de un grupo de trabajo interinstitucional para recabar y compartir información sobre riesgos en la investigación nanomédica.	7	-
Smolkova, Dusinska y Gabelova (2017)	Eslovaquia	Se revisan estudios sobre la posible toxicidad epigenética de las nanomedicinas. El tema ha sido poco explorado y la evidencia disponible no es concluyente.	35	-
Halappanavar <i>et al.</i> (2018)	Canadá	Se explora el potencial que tiene la biología de sistemas en la evaluación de riesgos de los nanomateriales empleados en nanomedicina.	33	4
Mahapatra <i>et al.</i> (2018)	Reino Unido	Se recoge la opinión de 66 expertos en nanomedicina de la Unión Europea acerca de pertinencia de los procedimientos actuales para la evaluación de riesgos ambientales de los productos nanomédicos.	14	-
Rycroft <i>et al.</i> (2018)	Estados Unidos	Se propone un análisis de decisiones multicriterio para evaluar los riesgos de los productos nanomédicos.	20	-

Fuente: Elaboración de los autores.

de fecha anterior al Brexit (salida del Reino Unido de la Unión Europea en enero de 2020). Los únicos países de América Latina que aparecen son México y Brasil; en otro trabajo (Invernizzi *et al.*, 2015) se ha reportado que estos dos países lideran la producción científica sobre nanotecnología en la región.

FIGURA 2. Distribución de los artículos por tema (A) y por país (B).



Fuente: Elaboración de los autores.

En lo que respecta a los parámetros de Dimensions, en las tablas 2, 3, 4 y 5 se observa que los artículos más citados pertenecen a las áreas de riesgos y ética: el trabajo de Reilly (2007), que versa sobre los riesgos toxicológicos de los nanotubos de carbono, tiene 72 citas, mientras que el artículo de Resnik y Tinkle (2007), cuyo tema son las preocupaciones éticas derivadas de la nanomedicina, tiene 71 citas. Del total de 36 artículos revisados, solo 6 tienen actividad en redes sociales (nivel de atención Altmetrics). Esto indica que la mayoría los artículos no ha tenido difusión entre el público en general.

Aspectos generales de gobernanza

Los artículos que se clasificaron en este rubro abordan los siguientes temas: gobernanza de la nanomedicina en países específicos como India y Brasil (Vivekanandan, 2009; Giroto Carelli Hermes y Haidamus de Oliveira Basto, 2014), percepción de la nanomedicina en adultos jóvenes (Nerlich, Clarke y Ulph, 2007) e implicaciones éticas y sociales de la nanomedicina (Sandler, 2009; de Cózar Escalante, 2012). Destaca el trabajo de Vivekanandan (2009) porque explora simultáneamente varios aspectos de la gobernanza que van desde lo financiero hasta lo ético. Vivekanandan identificó los principales desafíos de gobernanza que enfrentaba la nanomedicina en India durante la primera década de este siglo: a) escasa vinculación entre centros de investigación y empresas; b) mala coordinación de políticas; c) limitaciones de financiamiento; d) poca participación del sector privado; e) baja prioridad a la investigación de riesgos; f) fuerte influencia de la globalización en las agendas de investigación, y, g) polarización del debate público. Este autor señala varias situaciones que ilustran estos desafíos. Por ejemplo, la mala coordinación de políticas se observa en los objetivos contradictorios de algunas dependencias gubernamentales de India relacionadas con la investigación y desarrollo (I+D) en nanomedicina. Tal es el caso del Ministerio de Salud y Bienestar Familiar (Ministry of Health and Family Welfare) y el Departamento de Ciencia y Tecnología (Department of Science and Technology): mientras que el primero establece que se debe garantizar la seguridad de los nuevos medicamentos, el segundo prioriza la investigación básica y aplicada sin prestar mucha atención a la investigación de riesgos. En lo que concierne a la influencia de la globalización en la definición de agendas de investigación, Vivekanandan señala que India debe orientar el desarrollo de la nanomedicina a resolver problemas locales y evitar seguir de forma acrítica las tendencias internacionales: se debe priorizar la I+D en enfermedades infecciosas, que tienen una elevada tasa de mortalidad en India, en vez hacerlo en otro tipo de enfermedades como las cardiovasculares, que son más frecuentes en los países desarrollados pero que tienen poca incidencia en India. Respecto al debate de los pros y contras de la nanomedicina, Vivekanandan advierte que la adopción de posiciones extremas, tanto por parte de los defensores como de los críticos de la nanomedicina, podría generar desconfianza y rechazo entre

el público, tal como ha ocurrido con el debate de los organismos genéticamente modificados.

Regulación de la nanomedicina

En algunas regiones y países que se abarcaron en esta revisión de la literatura, se identificó la no existencia de marcos normativos específicos para la nanomedicina, pues esta se rige por legislaciones ya existentes aplicables a medicamentos y dispositivos médicos; es el caso, por ejemplo, de la Unión Europea (Gispert, 2012), Brasil (Cancino, Marangoni y Zucolotto, 2014) y Australia (Rahim, 2019). Ante esta incertidumbre regulatoria, se han propuesto algunos mecanismos alternativos de regulación tales como códigos de conducta, estándares voluntarios y procedimientos de vigilancia (D'Silva, Robinson y Shelley-Egan, 2012). Un ejemplo de esto es el trabajo de Anand, Srivastava y Sarma (2011), en el que se sugiere implementar estándares voluntarios en la industria nanomédica de la India para tener un mejor control sobre impactos ambientales, peligros ocupacionales, eliminación de desechos, etcétera.

Vidal Correa (2016) señala la importancia de definir adecuadamente los términos nanotecnología, nanomaterial, nanopartícula, entre otros, en el contexto jurídico. En este sentido, Bawa (2016) reporta que la regulación de los productos nanomédicos en el marco regulatorio de la Administración de Medicamentos y Alimentos de Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) se ha visto obstaculizada por la falta de definiciones claras sobre nanomedicina y nanotecnología. Este problema también se ha identificado en la regulación de la Unión Europea (Dorbeck-Jung y Chowdhury, 2011). En términos simples, la nanomedicina se puede definir como la aplicación de la nanotecnología en medicina (Szelenyi, 2012; Jain, 2017), pero esta definición requiere esclarecer primero el concepto de nanotecnología. Una de las definiciones de nanotecnología más conocidas es la que propone la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de los Estados Unidos (NNI, por sus siglas en inglés), que dice que lo siguiente: Nanotechnology is the understanding and control of matter at the nanoscale, at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications¹ (NNI, S. f.). Desafortunadamente, esta definición de nanotecnología no es del todo compatible con los desarrollos científicos e innovaciones llevadas a cabo en el campo de la nanomedicina. Muchas nanoestructuras empleadas en nanomedicina no se ajustan al rango de tamaño establecido en esta definición; tal es el caso de los liposomas y otros nanotrasportadores cuyo tamaño puede superar el límite de los 100 nm (Crommelin, Van Hoogevest y Storm, 2020). Bawa (2016) señala que el rango de 1 a 100 nm es un límite arbitrario que deja fuera de la definición a varios

¹ N del E: La nanotecnología trata la comprensión, el control y manipulación de la materia en nanoescala, esto es, en dimensiones aproximadamente entre 1 y 100 nanómetros, donde fenómenos únicos posibilitan aplicaciones innovadoras y novedosas.

productos nanomédicos y, a manera de ejemplo, menciona algunos nanomedicamentos que ya se encuentran en el mercado y que superan el tamaño de 100 nm: Abraxane® (~ 130 nm), Myocet® (~ 190 nm), DepoCyt® (10,000-20,000 nm), Amphotec® (~ 130 nm), Epaxal® (~ 150 nm), Inflexal® (~ 150 nm), Lipodox® (180 nm), Oncaspar® (50-200 nm), por mencionar algunos. La FDA, en su informe más reciente sobre nanotecnología (FDA, 2020), aclara que no cuenta con definiciones reglamentadas de los términos “nanotecnología”, “nanomaterial”, “nanoescala” y otros relacionados, pero utiliza dos criterios para determinar si un producto involucra nanotecnología: 1) al menos una de las dimensiones de la partícula está en el rango de 1 a 100 nm, y, 2) se observan propiedades novedosas atribuibles al tamaño de partícula hasta un límite de 1000 nm. Estos criterios de la FDA se asemejan a la definición de nanotecnología de la NNI, en el sentido de que restringen lo nano a un tamaño fijo. Bawa (2016) afirma que se deben establecer definiciones más adecuadas para abordar los asuntos regulatorios y propone la siguiente definición de nanotecnología: The design, characterization, production, and application of structures, devices, and systems by controlled manipulation of size and shape at the nanometer scale (atomic, molecular, and macromolecular scale) that produces structures, devices, and systems with at least one novel/ superior characteristic or property.² Bawa considera que esta definición sería útil en el entorno regulatorio porque se centra en las propiedades novedosas de la materia atribuibles a la nanoescala, sin restringir esta a un tamaño fijo que excluya a ciertos productos nanomédicos.

En algunos de los artículos revisados se destaca la propuesta de adoptar el principio precautorio en la regulación de la nanomedicina (Gispert, 2012; Andorno y Biller-Andorno, 2014; Lima-Dora, Teixeira-Primo y de-Moraes-Soares-Araújo, 2019). Este principio establece que “cuando una actividad amenaza con dañar la salud humana o el medio ambiente, deben adoptarse medidas de tutela anticipadas y pertinentes, aún cuando todavía no se hayan establecido plenamente y de modo científico las relaciones de causa-efecto” (Berger y Filho, 2022). En el caso de la nanomedicina, aún hay incertidumbre sobre los posibles efectos negativos de los nanomateriales en la salud humana, por lo que se justifica la implementación del principio precautorio.

Otro asunto importante que se discute en la literatura es la necesidad de regular y vigilar la investigación nanomédica en seres humanos. Wolf y Jones (2011) señalan que los riesgos de este tipo de investigación no se restringen solo a las personas que participan como sujetos de estudio, sino que también se extienden a los trabajadores de los laboratorios, contactos cercanos y medio ambiente. Wolf y Jones proponen la creación de una agencia federal en

² El diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, aparatos y sistemas controlados y manipulados en forma y tamaño a escala nanométrica (a escala atómica, molecular o macromolecular) que produzca estructuras, aparatos y sistemas con al menos una novedosa, innovadora o superior característica o propiedad.

Estados Unidos para vigilar la investigación nanomédica en seres humanos. Las principales funciones de esta agencia serían 1) revisar los protocolos de investigación; 2) monitorear los ensayos clínicos, y, 3) brindar orientación a los investigadores en cuestiones éticas, científicas y sociales. La propuesta de estos autores se basa en una revisión de los modelos de vigilancia que se han aplicado en otras áreas de investigación igualmente delicadas, que involucran pruebas en humanos, tales como la terapia génica, investigación pediátrica, trasplante de tejidos fetales y xenotrasplantes (trasplante de células, tejidos u órganos entre especies distintas).

Duncan y Gaspar (2011) refieren otras cuestiones importantes sobre la regulación de la nanomedicina: a) desarrollo de mecanismos que garanticen la seguridad de los nanomedicamentos similares o genéricos; b) necesidad de que las agencias reguladoras estén actualizadas con los rápidos avances de la nanomedicina, y, c) monitoreo proactivo de las legislaciones para evitar la existencia de brechas regulatorias.

Aspectos éticos de la nanomedicina

La naturaleza altamente interdisciplinaria de la nanomedicina implica el trabajo en conjunto de especialistas de distintas áreas como ingeniería, medicina, biología, física, etc. En cada una de estas profesiones, los códigos de ética o el énfasis que se le da a ciertos valores éticos como la eficiencia o utilidad pueden variar. Por esta razón, Bawa y Johnson (2009) señalan la necesidad de contar con un código de ética específico para la nanomedicina. En este sentido, López Goerne y Paoli Bolio (2009) elaboraron una propuesta de un código de ética para la nanomedicina en el que abordan aspectos como las relaciones médico-paciente, experimentación en seres humanos, medio ambiente, políticas públicas, educación y negocios en el sector de los nanomedicamentos.

La llegada de los productos nanomédicos al mercado y a los usuarios finales genera preocupaciones éticas debido a los posibles riesgos de estos productos. Ganau *et al.* (2016) consideran que los usuarios finales de los productos nanomédicos deben estar informados sobre los beneficios y riesgos de estos productos, y para ello proponen el marco nanoético que está representado en la figura 3. Este marco está compuesto por seis etapas que se extienden a lo largo de toda la vida de útil de los productos nanomédicos: 1) identificar las necesidades clínicas y el contexto en el que se implementará el producto nanomédico; 2) puntualizar sus alcances; 3) evaluar sus ventajas y limitaciones; 4) hacer comparaciones con estándares de referencia, siempre que sea posible; 5) analizar el impacto percibido por los pacientes, y, 6) monitorear los efectos a largo plazo de los nanoprodutos. Ganau *et al.* consideran que la implementación de este marco nanoético permitiría a los científicos y médicos comunicar de mejor manera los pros y contras de los productos nanomédicos a los pacientes, de tal manera que estos puedan tomar decisiones más informadas sobre el uso de dichos productos.

FIGURA 3. Propuesta de marco ético para aplicarse en el diseño, producción y comercialización de los productos nanomédicos.



Fuente: Tomado y adaptado de Ganau et al. (2016).

Otros aspectos de la nanomedicina que se han examinado desde el punto de vista ético son la concentración de patentes en unas pocas empresas multinacionales (Bawa y Johnson, 2009), inequidad en el acceso a los productos nanomédicos (Álvarez-Díaz, 2011), externalidades negativas en la investigación clínica (Kimmelman, 2012) y las preocupaciones éticas relacionadas con los nuevos usos de los nanobiosensores en los deportes (Evans, McNamee y Guy, 2017).

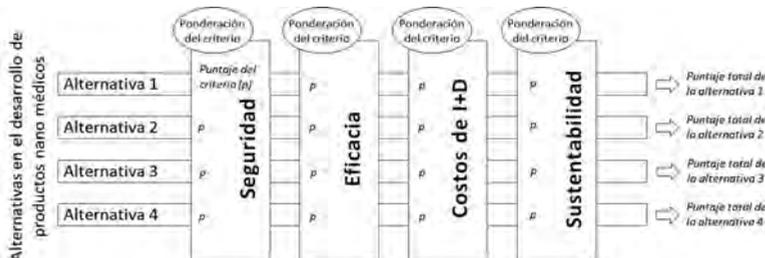
Evaluación de riesgos de los productos nanomédicos

Uno de las áreas más importantes de la evaluación de riesgos es la nanotoxicología, es decir, el estudio de los efectos adversos de los nanomateriales en seres vivos y el medio ambiente. En esta revisión de la literatura se identificaron algunos trabajos relacionados con la toxicidad de nanomateriales a nivel celular y genético. Reilly (2007) exploró los riesgos toxicológicos de los nanotubos de carbono en nanomedicina. Estas nanoestructuras tienen potencial para usarse como transportadores de radiofármacos en tratamientos de medicina nuclear, pero es posible que representen algunos riesgos toxicológicos. Reilly menciona que los nanotubos de carbono insolubles en agua son altamente tóxicos para distintos tipos de células, entre las que se encuentran los queratinocitos humanos, las células neuronales del cerebro de rata y células embrionarias de riñón humano. Por otra parte, los nanotubos de carbono solubles en agua tienen una mejor biocompatibilidad y aparentemente no producen efectos nocivos en las células, al menos en experimentos *in vitro*; sin embargo, Reilly considera que se deben realizar más estudios, sobre todo *in vivo*, antes de emplear estas nanoestructuras en nanomedicina. Otro asunto que se ha analizado desde la nanotoxicología son los posibles riesgos de utilizar material genético nanoestructurado en la administración de fármacos (Tyshenko, 2008). A diferencia de los nanomateriales inorgánicos, el material genético presenta una excelente biocompatibilidad y por lo tanto, podría usarse en la construcción de nanoestructuras para el transporte de fármacos. Aunque los riesgos del material genético nanoestructurado parecen ser muy bajos en comparación con los riesgos de otros nanomateriales, Tyshenko advierte que se deben hacer estudios toxicológicos

del material genético nanoestructurado para saber qué ocurre con él dentro del cuerpo humano, una vez que se degrada. Otro tema de preocupación en la nanotoxicología es la toxicidad epigenética de los nanomedicamentos. Smolkova, Dusinska y Gabelova (2017) mencionan que este tema ha sido poco explorado y que los datos disponibles provienen principalmente de estudios *in vitro* y en animales, por lo que sería deseable llevar a cabo nuevos estudios que den información sobre la toxicidad epigenética en humanos.

Hace más de una década Vivekanandan (2009) señalaba la poca prioridad que se le daba a la investigación de riesgos de nanomateriales usados en aplicaciones médicas, por lo que se tenía escasa información para evaluar los riesgos de los productos nanomédicos. Esto ha venido cambiando a medida que se genera nuevo conocimiento respecto a los nanomateriales; ya no solo sobre sus propiedades, sino también sobre sus implicaciones en seguridad, salud y medio ambiente. En tiempos más recientes, Rycroft *et al.* (2018) refieren que el principal desafío enfrentado por la evaluación de riesgos en nanomedicina ya no es la falta de información como ocurría en el pasado, sino el cómo integrar toda la información que hoy se tiene disponible. En este sentido, Rycroft *et al.* (2018) proponen una metodología basada en el análisis de decisiones multicriterio para la evaluación de riesgos, la cual se esquematiza en la figura 4. Al inicio del desarrollo de un producto nanomédico se deben plantear varias alternativas: por ejemplo, en el desarrollo de un tratamiento contra el cáncer se podrían proponer distintos nanotransportadores como dendrímeros, liposomas, nanopartículas metálicas, etc. Posteriormente, establecer los criterios para evaluar cada una de las alternativas considerando cuatro rubros: seguridad, eficacia, costos de I+D y sustentabilidad. A cada uno de estos rubros se le asigna una ponderación distinta de acuerdo con su importancia. Después se recopila y analiza la evidencia disponible (publicaciones científicas, estudios de caso, resultados de pruebas preclínicas, etc.) y se asignan puntajes en cada rubro. Finalmente, se calcula el puntaje total para cada alternativa y se elige la que obtenga mejor calificación. La propuesta de estos autores es interesante porque permite evaluar los riesgos de manera objetiva, contempla varios tipos de riesgos y promueve el uso de esta información en la toma de decisiones respecto al diseño de productos nanomédicos.

FIGURA 4. Metodología de análisis de decisiones multicriterio para el diseño de productos nanomédicos.



Fuente: Tomado y adaptado de Rycroft *et al.* (2018).

Desafíos de gobernanza en la industria nanofarmacéutica

La nanomedicina adquiere una posición cada vez más relevante dentro de la industria farmacéutica, lo cual se ve reflejado en el incremento experimentado en el mercado de la nanomedicina en los últimos años. En 2009, el tamaño del mercado global de nanomedicina fue aproximadamente de 53 mil millones de dólares; en 2017, de 134.4 mil millones de dólares, y se prevé que para 2022 será de 293.1 mil millones de dólares (Gadekar *et al.*, 2021). A pesar de este crecimiento, hay algunos desafíos de gobernanza, principalmente de regulación y riesgos, que la nanomedicina enfrenta dentro de la industria farmacéutica. Hay carencia de regulaciones o estándares específicos para la nanomedicina en cuestiones de manufactura, control de calidad, seguridad y evaluación de la eficacia de los nanomedicamentos. Por ejemplo, la industria farmacéutica aplica buenas prácticas de laboratorio (BPL) para lograr la seguridad y calidad en sus productos; sin embargo, actualmente no se tienen BPL específicas para la nanomedicina (Zhang *et al.*, 2020). Tampoco se cuenta con procedimientos estandarizados para evaluar los riesgos toxicológicos de los nanomedicamentos (Wu, Wang y Li, 2020).

Conclusiones

La revisión sistemática de literatura realizada en este trabajo permitió trazar un panorama de la gobernanza de la nanomedicina. Los artículos que se revisaron abordan temas sobre regulación, ética y evaluación de riesgos de la nanomedicina. En materia de regulación se encontró que en varios países no hay regulaciones específicas para la nanomedicina y que la normatividad aplicable a productos nanomédicos, tanto de Europa como de Estados Unidos, ha tenido dificultades relacionadas con la falta de definiciones precisas sobre nanotecnología, nanomedicina y su intersección. En el tema ético se ubicaron artículos que abordan preocupaciones en torno a la equidad en el acceso a los productos nanomédicos, la concentración de patentes en pocas empresas, el nuevo uso los de nanobiosensores en los deportes, el consentimiento informado, entre otros. En cuanto a evaluación de riesgos, se exploraron estudios nanotoxicológicos sobre nanomateriales con potenciales aplicaciones en medicina, tales como los nanotubos de carbono y material genético nanoestructurado. A través de una consulta a la plataforma Dimensions se encontró que la mayoría de estos artículos están citados en otros trabajos académicos, pero tienen poca o nula presencia en redes sociales. Esto puede ser un indicio de que el público en general tiene poco interés en estos temas.

Esta revisión también permitió visualizar cómo se ha desarrollado la gobernanza de la nanomedicina a lo largo de tiempo. Algunos temas de gobernanza han sufrido cambios; por ejemplo, en uno de los artículos más antiguos de esta revisión (Vivekanandan, 2009), se reportaba que la investigación de riesgos tenía poca prioridad; en contraste, en un trabajo más reciente (Rycroft

et al., 2018), se menciona que la información sobre riesgos se ha incrementado de manera sustancial en los últimos años. Esto va de la mano con un incremento en la visibilidad del tema de riesgos a la salud y el medio ambiente a partir del uso de nanomateriales manufacturados. Por ejemplo, los estudios sobre los riesgos de los nanomateriales manufacturados se han incrementado exponencialmente; en PubMed (2005) se ubicaron 24 artículos y en 2015 cerca de 4 mil (Shvedova, Pietroiusti y Kagan, 2016). Esto marca una tendencia importante en la información científica disponible que nutre la toma de decisiones respecto al uso de la nanotecnología en diversos campos. Por otra parte, hay asuntos donde no se han observado cambios importantes. En 2011 Dorbeck-Jung y Chowdhury reportaban deficiencias en la regulación europea debidas a la falta de definiciones precisas de lo que es nano; posteriormente, Bawa (2016) reportó la misma situación para el caso de la regulación estadounidense, y actualmente, en el informe más reciente sobre nanotecnología de la FDA (2020), se sigue observando ambigüedad en este tema.

La revisión de literatura presentada en este artículo permitió identificar las principales áreas de la gobernanza en nanomedicina: regulación, aspectos éticos y evaluación de riesgos. Las futuras revisiones que se hagan sobre el tema podrían centrarse en alguna de estas áreas en particular.

Los principales temas de gobernanza que se han estudiado en América Latina son la carencia de regulaciones adecuadas (Cancino, Marangoni y Zucolotto, 2014; Lima-Dora, Teixeira-Primo y de-Moraes-Soares-Araújo, 2019) y las implicaciones éticas de la nanomedicina (López Goerne y Paoli Bolio, 2009; Álvarez-Díaz, 2011; Delgado Ramos y Hernández Burciaga, 2013). Esta disciplina tiene gran potencial para atender los problemas de salud que existen en América Latina, pero sin las regulaciones y políticas adecuadas, su alcance social será limitado. Por tal motivo es necesario que se fortalezca la gobernanza de la nanomedicina en la región.

Referencias

- Altenstetter, Christa. (2011). Medical device regulation and nanotechnologies: determining the role of patient safety concerns in policymaking. *Law & Policy*, 33 (2): 227-55. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9930.2010.00337.x>
- Álvarez-Díaz, Jorge Alberto. (2011). Retos de la bioética en la medicina del siglo XXI. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 28 (4): 657-63.
- Anand, Manish, Nidhi Srivastava y Shilpanjali Sarma. (2011). Policy and ethical concerns in nanotechnology safety: case of Indian Health Sector. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 7 (1): 34-35. <https://doi.org/10.1166/jbn.2011.1188>
- Andorno, Roberto y Nikola Biller-Andorno. (2014). The risks of nanomedicine and the precautionary principle. En Bert Gordijn y Anthony Mark Cutter (eds.), *In pursuit of nanoethics*, 131-45. The International Library of Ethics, Law and Technology. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6817-1_9

- Anzaldo, Mónica, Michelle Chauvet y Luis A. Maldonado. (2014). Fondos públicos para la investigación en nanotecnologías en México y el cambio de paradigma de la política de CTI. *Interciencia*, 39 (1): 8-15.
- Basova, Tamara V., Evgeniia S. Vikulova, Svetlana I. Dorovskikh, Aseel Hassan y Natalya B. Morozova. (2021). The use of noble metal coatings and nanoparticles for the modification of medical implant materials. *Materials & Design*, 204 (junio): 109672. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109672>
- Bawa, Raj. (2016). FDA and nano: baby steps, regulatory uncertainty and the bumpy road ahead. En *Handbook of Clinical Nanomedicine: Law, Business, Regulation, Safety, and Risk*, 1502. Nueva York: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/b19910>
- Bawa, Raj y Summer Johnson. (2009). Emerging issues in nanomedicine and ethics. En Fritz Allhoff y Patrick Lin (eds.), *Nanotechnology & society: Current and emerging ethical issues*, 207-23. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6209-4_11
- Bawa, Raj y Summer Johnson. (2020). Overview of ethical issues in nanomedicine. En Mousa, Bawa and Audette (eds.), *The road from nanomedicine to precision*. <https://doi.org/10.1201/9780429295010>
- Berger, Mauricio y Airton Guilherme Berger Filho. (2022). Nano-governance, nano-regulación y, ¿nano-ciudadanía? *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 15 (28): 1e-26e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69659>
- Bhatia, Pooja y Archana Chugh. (2017). A multilevel governance framework for regulation of nanomedicine in India. *Nanotechnology Reviews*, 6 (4): 373-82. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2016-0083>
- Cancino, Juliana, Valéria S. Marangoni y Valtencir Zucolotto. (2014). Nanotecnologia em medicina: aspectos fundamentais e principais preocupações. *Química Nova*, 37 (junio): 521-26. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140086>
- Caracciolo, Giulio. (2015). Liposome-protein corona in a physiological environment: challenges and opportunities for targeted delivery of nanomedicines. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 11 (3): 543-57. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2014.11.003>
- Chen, X. y H. J. Schluesener. (2008). Nanosilver: a nanoproduct in medical application. *Toxicology Letters*, 176 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2007.10.004>
- Chowdhury, Nupur. (2010). Regulation of nanomedicines in the EU: distilling lessons from the pediatric and the advanced therapy medicinal products approaches. *Nanomedicine*, 5 (1): 135-42. <https://doi.org/10.2217/nnm.09.91>
- Cózar Escalante, José Manuel de. (2012). Dimensiones de la investigación social sobre la nanobiotecnología. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad – CTS*, 7 (20): 1-17.
- Crommelin, Daan J. A., Peter van Hoogevest y Gert Storm. (2020). The role of liposomes in clinical nanomedicine development. What now? Now what? *Journal of Controlled Release*, 318 (febrero): 256-63. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.12.023>
- De Ville, Kenneth A. (2008). Law, regulation and the medical use of nanotechnology. En Fabrice Jotterand (ed.), *Emerging conceptual, ethical and policy issues in bion-*

- anotechnology*, 181-200. Philosophy and Medicine. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8649-6_11
- Delgado Ramos, Gian Carlo y Luis Alberto Hernández Burciaga. (2013). Avances e implicaciones éticosociales de la nanomedicina: una revisión desde el caso del cáncer cerebral. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 6 (10): 63-85. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2013.10.50965>
- Dorbeck-Jung, Brbel R. y Nupur Chowdhury. (2011). *Is the European medical products authorisation regulation equipped to cope with the challenges of nanomedicines?* SSRN Scholarly Paper ID 1782436. Rochester, NY: Social Science Research Network. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9930.2011.00339.x>
- Duncan, Ruth y Rogerio Gaspar. (2011). Nanomedicine(s) under the microscope. *Molecular Pharmaceutics*, 8 (6): 2101-41. <https://doi.org/10.1021/mp200394t>
- D'Silva, Joel, Douglas K. R. Robinson y Clare Shelley-Egan. (2012). A game with rules in the making – how the high probability of waiting games in nanomedicine is being mitigated through distributed regulation and responsible innovation. *Technology Analysis & Strategic Management*, 24 (6): 583-602. <https://doi.org/10.1080/09537325.2012.693671>
- EGE. (2007). *Opinion on the ethical aspects of nanomedicine – Opinion N° 21*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4d7d9c99-2129-42e1-993e-c815b91f256b/language-en/format-PDF/source-77404425#>
- EU NanoSafety Cluster. (S. f.). NanoSafety Cluster. (Consultado, 4 de agosto de 2021). <https://www.nanosafetycluster.eu/>
- Evans, Robert, Michael McNamee y Owen Guy. (2017). Ethics, nanobiosensors and elite sport: the need for a new governance framework. *Science and Engineering Ethics*, 23 (6): 1487-1505. <https://doi.org/10.1007/s11948-016-9855-1>
- FDA. (2020). *Nanotechnology—Over a decade of progress and innovation*. <https://www.fda.gov/media/140395/download>
- Foladori, Guillermo. (2009). La gobernanza de las nanotecnologías. *Sociológica (México)*, 24 (71): 125-53.
- Funari, Riccardo, Kang-Yu Chu y Amy Q. Shen. (2020). Detection of antibodies against SARS-CoV-2 spike protein by gold nanospikes in an opto-microfluidic chip. *Biosensors and Bioelectronics*, 169 (diciembre): 112578. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112578>
- Gadekar, Vedant, Yogeshwari Borade, Suraj Kannaujia, Kuldeep Rajpoot, Neelima Anup, Vishakha Tambe, Kiran Kalia y Rakesh K. Tekade. (2021). Nanomedicines accessible in the market for clinical interventions. *Journal of Controlled Release*, 330 (febrero): 372-97. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.12.034>
- Ganau, Mario, Lara Prisco, Nikolaos Syrmos y Laura Ganau. (2016). Principles of nanoethics: theoretical models and clinical practice. En *Handbook of Clinical Nanomedicine: Law, Business, Regulation, Safety, and Risk*. Nueva York: Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/b19910>
- Giroto Carelli Hermes, Elisangela y Paulo Roberto Haidamus de Oliveira Basto. (2014). Nanotecnología: progreso científico, material, global e ético. *Persona y Bioética*, 18 (2): 107-18.

- Gispert, Ignasi. (2012). Overview of nanomedicines regulation in the European Union. En Jesús M. de la Fuente y V. Grazu (eds.), *Frontiers of nanoscience*, 4:487-507. Nanotechnology. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415769-9.00016-9>
- Graur, F., R. Elisei, A. Szasz, H. C. Neagos, A. Muresan, L. Furcea, I. Neagoe, C. Braicu, G. Katona y M. Diudea. (2011). Ethical issues in nanomedicine. En Simona Vlad y Radu V. Ciupa (eds.), *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology*, 9-12. IFMBE Proceedings. Berlin: Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22586-4_3
- Haker, Hille. (2013). Nanomedicine and European Ethics – Part One. En *Ethics for Graduate Researchers*, 87-99. Oxford: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416049-1.00006-4>
- Halappanavar, Sabina, Ulla Vogel, Hakan Wallin y Carole L. Yauk. (2018). Promise and peril in nanomedicine: the challenges and needs for integrated systems biology approaches to define health risk. *WIREs Nanomedicine and Nanotechnology*, 10 (1): e1465. <https://doi.org/10.1002/wnan.1465>
- Hogle, Linda F. (2012). Concepts of risk in nanomedicine research. *The Journal of Law, Medicine & Ethics*, 40 (4): 809-22. <https://doi.org/10.1111/j.1748-720X.2012.00709.x>
- Invernizzi, Noela, Guillermo Foladori, Eduardo Robles-Belmont, Edgar Záyago Lau, Edgar Arteaga Figueroa, Carolina Bagattolli, Tomás Javier Carrozza, Adriana Chiancone y William Urquijo. (2015). Nanotechnology for social needs: contributions from latin american research in the areas of health, energy and water. *Journal of Nanoparticle Research*, 17 (5): 233. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3037-y>
- Jain, Kewal K. (2017). Introduction. En Kewal K. Jain (ed.), *The Handbook of Nanomedicine*, 1-9. Nueva York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6966-1_1
- Khare, Vaibhav, Ajit K. Saxena y Prem N. Gupta. (2015). Chapter 15 – Toxicology considerations in nanomedicine. En Sabu Thomas, Yves Grohens, y Neethu Ninan (eds.), *Nanotechnology applications for tissue engineering*, 239-61. Oxford: William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-32889-0.00015-7>
- Khushf, George. (2007). Upstream ethics in nanomedicine: a call for research. *Nanomedicine*, 2 (4): 511-21. <https://doi.org/10.2217/17435889.2.4.511>
- Kim, Jiyoung, Young-um Jo y Kun Na. (2020). Photodynamic therapy with smart nanomedicine. *Archives of Pharmacal Research*, 43 (1): 22-31. <https://doi.org/10.1007/s12272-020-01214-5>
- Kimmelman, Jonathan. (2012). Beyond human subjects: risk, ethics, and clinical development of nanomedicines. *The Journal of Law, Medicine & Ethics*, 40 (4): 841-47. <https://doi.org/10.1111/j.1748-720X.2012.00712.x>
- Lemine, O. M. (2019). Chapter 7 – Magnetic hyperthermia therapy using hybrid magnetic nanostructures. En Raghvendra Ashok Bohara y Nanasahab Thorat (eds.), *Hybrid nanostructures for cancer theranostics*, 125-38. Micro and Nano Technologies. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813906-6.00007-X>
- Li, Xue, Xue-Ning Zhang, Xiao-Dong Li y Jin Chang. (2016). Multimodality imaging in nanomedicine and nanotheranostics. *Cancer Biology & Medicine*, 13 (3): 339-

48. <https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2016.0055>
- Lima-Dora, Cristiana, Fabian Teixeira-Primo y Gabriela de-Moraes-Soares-Araújo. (2019). Reflexões bioéticas acerca da inovação em nanomedicamentos. *Revista de Bioética y Derecho*, 45: 197-212.
- López Goerne, Tessy María y Antonio Paoli Bolio. (2009). Ética para nanomedicina: primera propuesta para la elaboración de un código. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 2 (2). <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2009.2.53585>
- Mahapatra, Indrani, Julian R. A. Clark, Peter J. Dobson, Richard Owen, Iseult Lynch y Jamie R. Lead. (2018). Expert perspectives on potential environmental risks from nanomedicines and adequacy of the current guideline on environmental risk assessment. *Environmental Science: Nano*, 5 (8): 1873-89. <https://doi.org/10.1039/C8EN00053K>
- Marchant, Gary E., Douglas J. Sylvester, Kenneth W. Abbott y Tara Lynn Danforth. (2010). International harmonization of regulation of nanomedicine. *Studies in Ethics, Law, and Technology*, 3 (3). <https://doi.org/10.2202/1941-6008.1120>
- Meel, Roy van der, Einar Sulheim, Yang Shi, Fabian Kiessling, Willem J. M. Mulder y Twan Lammers. (2019). Smart cancer nanomedicine. *Nature Nanotechnology*, 14 (11): 1007-17. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0567-y>
- Nerlich, Brigitte, David D. Clarke y Fiona Ulph. (2007). Risks and benefits of nanotechnology: How young adults perceive possible advances in nanomedicine compared with conventional treatments. *Health, Risk & Society*, 9 (2): 159-71. <https://doi.org/10.1080/13698570701306856>
- NNI. (S. f.). What it is and how it works | National Nanotechnology Initiative. (Consultado: 9 de mayo de 2021). <https://www.nano.gov/nanotech-101/what>
- Ocampo, José Antonio. (2015). La gobernanza económica y social en el sistema de las Naciones Unidas. En *Gobernanza global y desarrollo: Nuevos desafíos y prioridades de la cooperación internacional*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (S. f.). Technology governance. Technology governance. (Consultado: 23 de mayo de 2021). <https://www.oecd.org/sti/science-technology-innovation-outlook/technology-governance/>
- OCDE y Allianz. (S. f.). Opportunities and risks of nanotechnologies. <https://www.oecd.org/science/nanosafety/44108334.pdf>
- Pierre, Jon y B. Guy Peters. (2000). *Governance, politics, and the State*. Nueva York: St. Martin's Press.
- Qiu, Guangyu, Zhibo Gai, Yile Tao, Jean Schmitt, Gerd A. Kullak-Ublick y Jing Wang. (2020). Dual-functional plasmonic photothermal biosensors for highly accurate severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 detection. *ACS Nano*, 14 (5): 5268-77. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c02439>
- Rahim, Mia M. (2019). Nanomedicine regulation in Australia. *Alternative Law Journal*, 44 (2): 133-37. <https://doi.org/10.1177/1037969X18815737>
- Rana, Vikas y Radhika Sharma. (2019). Chapter 5 – Recent advances in development of nano drug delivery. En Shyam S. Mohapatra, Shivendu Ranjan, Nandita Das-

- gupta, Raghvendra Kumar Mishra y Sabu Thomas (eds.), *Applications of targeted nano drugs and delivery systems*, 93-131. Micro and Nano Technologies. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814029-1.00005-3>
- Reilly, Raymond M. (2007). Carbon nanotubes: potential benefits and risks of nanotechnology in nuclear medicine. *Journal of Nuclear Medicine*, 48 (7): 1039-42. <https://doi.org/10.2967/jnumed.107.041723>
- Renn, O. y M. C. Roco. (2006). Nanotechnology and the need for risk governance. *Journal of Nanoparticle Research*, 8 (2): 153-91. <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9092-7>
- Resnik, David B. y Sally S Tinkle. (2007). Ethics in nanomedicine. *Nanomedicine*, 2(3): 345-50. <https://doi.org/10.2217/17435889.2.3.345>
- Rycroft, Taylor, Benjamin Trump, Kelsey Poinsatte-Jones e Igor Linkov. (2018). Nanotoxicology and nanomedicine: making development decisions in an evolving governance environment. *Journal of Nanoparticle Research*, 20 (2): 52. <https://doi.org/10.1007/s11051-018-4160-3>
- Saldívar-Tanaka, Laura. (2019). Regulando la nanotecnología. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 12 (22): 37-57. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.63140>
- Sandler, Ronald. (2009). Nanomedicine and nanomedical ethics. *The American Journal of Bioethics: AJOB*, 9 (10): 16-17. <https://doi.org/10.1080/15265160902995117>
- Sassen, Saskia. (2010). *Territorio, autoridad y derechos: De los ensamblajes medievales a los ensamblajes globales*. Buenos Aires: Katz Editores.
- SCENIHR. (2015). *Guidance on the determination of potential health effects of nanomaterials used in medical devices*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2772/41391>
- Shvedova, Anna, Antonio Pietroiusti y Valerian Kagan. (2016). Nanotoxicology ten years later: lights and shadows. *Toxicology and Applied Pharmacology*, The First Decade of Nanotoxicology: Achievements, Disappointments and Lessons, 299 (mayo): 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.02.014>
- Smolkova, Bozena, Maria Dusinska y Alena Gabelova. (2017). Nanomedicine and epigenome. Possible health risks. *Food and Chemical Toxicology*, 109 (noviembre): 780-96. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.07.020>
- Sportelli, Maria Chiara, Margherita Izzi, Ekaterina A. Kukushkina, Syed Imdadul Hossain, Rosaria Anna Picca, Nicoletta Ditaranto y Nicola Cioffi. (2020). Can nanotechnology and materials science help the fight against SARS-CoV-2? *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 10 (4). <https://doi.org/10.3390/nano10040802>
- Szelenyi, Istvan. (2012). Nanomedicine: evolutionary and revolutionary developments in the treatment of certain inflammatory diseases. *Inflammation Research*, 61 (1): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00011-011-0393-7>
- Tyshenko, Michael G. (2008). Medical nanotechnology using genetic material and the need for precaution in design and risk assessments. *International Journal of Nanotechnology*, 5 (1): 116-23. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2008.016551>
- Vidal Correa, Laura Elena. (2016). Análisis comparativo de la regulación en nanotecnología en Estados Unidos y en la Unión Europea. *Boletín mexicano de derecho comparado*, 49

- (147): 277-301. <http://dx.doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2016.147.10646>
- Vivekanandan, Jayashree. (2009). Nano applications, mega challenges: the case of the health sector in India. *Studies in Ethics, Law, and Technology*, 3 (3). <https://doi.org/10.2202/1941-6008.1117>
- WHO. (2013). *Nanotechnology and human health: Scientific evidence and risk governance*. Report of the WHO expert meeting 10-11 December 2012, Bonn, Germany. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/108626>
- Wolf, Susan M. y Cortney M. Jones. (2011). Designing oversight for nanomedicine research in human subjects: systematic analysis of exceptional oversight for emerging technologies. *Journal of Nanoparticle Research*, 13 (4): 1449-65. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0237-y>
- Wu, Lin-Ping, Danyang Wang y Zibiao Li. (2020). Grand challenges in nanomedicine. *Materials Science and Engineering: C*, 106 (enero): 110302. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110302>
- Zhang, Chenyang, Liang Yan, Xin Wang, Shuang Zhu, Chunying Chen, Zhanjun Gu y Yuliang Zhao. (2020). Progress, challenges, and future of nanomedicine. *Nano Today*, 35 (diciembre): 101008. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101008>
- Zhu, Junwen y Weishu Liu. (2020). A tale of two databases: the use of Web of Science and Scopus in academic papers. *Scientometrics*, 123 (1): 321-35. <https://doi.org/10.1007/s11192-020-03387-8>

Alúmina anódica porosa (AAP): arreglo de nanocrisoles de α -alúmina de tamaño modulable[◇]

Porous anodic alumina (PAA): modulation size α -alumina nanocrucible array

Ricardo González Campuzano,*[†] María Esther Mata Zamora**

ABSTRACT: Due to the increasing interest in the synthesis of different structures at nanometric scale, porous anodic aluminas are an emerging alternative to the sophisticated and expensive methods used currently. In this work, we present a brief review on some recent experimental results to synthesize porous anodic aluminas with extra-large pore diameters (>200 nm), using mixtures of acids as electrolytes and high anodizing voltages. Additionally, we present studies related to thermal stability of porous anodic aluminas; these anodic aluminas are formed under standard conditions, using the most common electrolytes (sulfuric, oxalic and phosphoric acids). These studies have shown that anodic aluminas, initially amorphous, must transition through an elimination process of anions prior to the transformation to polycrystalline phases until them, finally achieve the most stable phase, α -alumina. Finally, we mention some of the most prominent applications these porous-anodic-alumina-nanostructures, obtained by non-conventional and heat treatment methods, might have.

KEYWORDS: porous anodic alumina (PAA), α -alumina membranes, thermotreatment PAA.

RESUMEN: Debido al creciente interés en la síntesis de diferentes estructuras a escala nanométrica, las alúminas anódicas porosas son una alternativa emergente a los métodos más sofisticados y costosos que se utilizan actualmente. En este trabajo se presenta una breve revisión acerca de algunos resultados experimentales recientes para sintetizar alúminas anódicas porosas con diámetros de poro extra grandes (>200 nm), usando mezclas de ácidos como electrolitos y voltajes altos de anodizado. Adicionalmente, se presentan estudios relacionados con la estabilidad térmica de las alúminas anódicas porosas, formadas en condiciones estándar, usando los electrolitos más comunes (ácidos sulfúrico, oxálico y fosfórico). Dichos estudios han mostrado que la alúmina anódica, de inicio amorfa, debe transitar por un proceso de eliminación de aniones previo a la transformación de fases policristalinas hasta alcanzar la fase más estable, α -alúmina. Finalmente, se mencionan algunas de las más destacadas aplicaciones que podrían tener las nanoestructuras obtenidas a partir de alúminas anódicas porosas obtenidas por métodos no convencionales y las tratadas térmicamente.

PALABRAS CLAVE: alúmina anódica porosa (AAP), membranas de α -alúmina, termotratamiento de AAP.

Recibido: 26 de febrero, 2021. Aceptado: 8 de julio, 2021. Publicado: 17 de septiembre, 2021.

[◇] Agradecemos a Omar Novelo y Josué E. Romero del Laboratorio Universitario de Microscopía Electrónica (LUME-IIM-UNAM) por las imágenes SEM.

* Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales.

** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología.

[†] Autor de correspondencia: naedra@ciencias.unam.mx



Introducción

El material de un crisol, además de soportar altas temperaturas y por ello ser estable térmicamente, también debe ser químicamente inerte. La alúmina en su fase cristalina alfa (o corindón) posee ambas propiedades y se le ha utilizado como material refractario en crisoles u hornos en los laboratorios de química, así como también en la industria cerámica (Gitzen, 1970). En general, el término *alúmina* se usa de manera indefinida en la literatura especializada para denotar los óxidos de aluminio hidratados (hidróxidos) u óxidos de aluminio parcialmente libres de agua (oxohidróxidos) o al corindón específicamente (Wefer y Misra, 1987). El significado más certero del término alúmina es en algunas ocasiones difícil de contextualizar; pero aquí el término es usado principalmente en el sentido de cualquier óxido de aluminio hidratado o anhidro tomado indistintamente, incluyendo cualquiera de las fases cristalinas y estado amorfo.

Ahora bien, si pensamos en otra de las aplicaciones del óxido de aluminio, es decir, como recubrimiento de superficies metálicas nos encontramos con dos aspectos muy interesantes. Uno, es la propiedad del aluminio por combinarse rápidamente con el oxígeno y formar una capa delgada de óxido superficial impenetrable y adherente que detiene el proceso de corrosión del aluminio metálico. La textura de esta película es muy regular, y bajo ciertas condiciones su espesor se puede controlar en el intervalo de los nanómetros a las decenas de micrómetro. El segundo aspecto es que las películas de óxido de aluminio que recubren la superficie del metal tienen la característica de formar una estructura de poros arreglados de forma más o menos regular en casos muy específicos conocida como alúmina anódica porosa (AAP). Esto último atrajo el interés de los investigadores en muchas de las actividades de desarrollo tecnológico y de investigación en el área de las nanociencias, debido al gran potencial de contar con un molde o plantilla para generar nanomateriales de diversa índole (Lee *et al.*, 2014). El propósito de este trabajo es presentar un panorama general de temas de investigación relativamente recientes. Uno de ellos es el de poder modular las dimensiones del diámetro de poro mayor a los 200 nm obtenidos por métodos de anodizado electroquímico convencional. El otro tema involucra la modificación de la composición y estructura cristalina de la AAP para obtener un material cerámico nanoestructurado con las características deseables de estabilidad térmica y resistencia a medios corrosivos tanto ácidos como alcalinos.

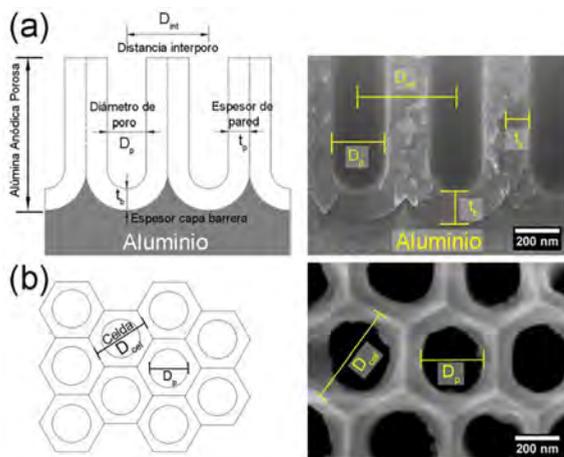
Inicialmente, se realiza una breve descripción acerca de la composición y estructura de las AAP obtenida por métodos electroquímicos bajo condiciones estándar de corriente o potencial fijos. Posteriormente, se mencionan algunos estudios recientes relativos a la posibilidad de extender las dimensiones de los parámetros de las celdas de la AAP, como la distancia interporo y diámetro de poro para la generación de novedosos arreglos nanométricos, tales como nanoconcavidades formadas en la superficie del aluminio y nanodomas formados en el lado opuesto a la superficie porosa. Aunque, en la mayoría de las aplicaciones que se le han dado a las AAP, no se ha requerido el

uso de tratamientos térmicos ni procesos de síntesis de nanoestructuras por arriba de la temperatura ambiente (Losic y Santos, 2015), resulta importante establecer que las AAP son susceptibles a cambios fisicoquímicos debido a su naturaleza amorfa y composición química. Es por ello que se hace una revisión de los estudios realizados en relación con la estabilidad térmica de las AAP y las propuestas para conseguir membranas de α -alúmina porosa.

Arreglo de celdas de óxido de aluminio anódico poroso (O AAP) o alúmina anódica porosa (AAP)

En general, la AAP se describe como un arreglo vertical de celdas de óxido de aluminio dispuestas de forma normal a la superficie del aluminio (figura 1). El conjunto de celdas forma un arreglo de mínima energía conocida como empaquetamiento hexagonal compacto. Cada celda contiene un poro al centro que se encuentra sellado en la base por un óxido anódico tipo capa barrera de geometría semiesférica. El mecanismo de crecimiento y formación de las celdas lo han descrito detalladamente Abdel-Karim y El-Raghy (2016), Lee *et al.* (2014) y Runge (2018). La estructura generalmente se define por varios parámetros estructurales, tales como la distancia interporo (D_{int}), diámetro de poro (D_p), espesor de la capa barrera (t_b), espesor de la pared de poro (t_w), densidad de poro (δ_p) y la porosidad (P). Se sabe que estos parámetros, que constituyen las características más notables de las AAP, dependen de las condiciones del anodizado: tipo y concentración del electrolito, potencial de anodizado, densidad de corriente, temperatura, entre otros (Lee *et al.*, 2014; Sulka, 2008). En la figura 1 se muestran imágenes, tanto esquemáticas como reales, de los parámetros estructurales de la AAP.

FIGURA 1. Diagramas esquemáticos representativos (izquierda) y micrografías SEM reales (derecha) de una AAP. (a) Vista de su sección transversal vertical y (b) vista superior indicando todos los parámetros geométricos que la caracterizan.



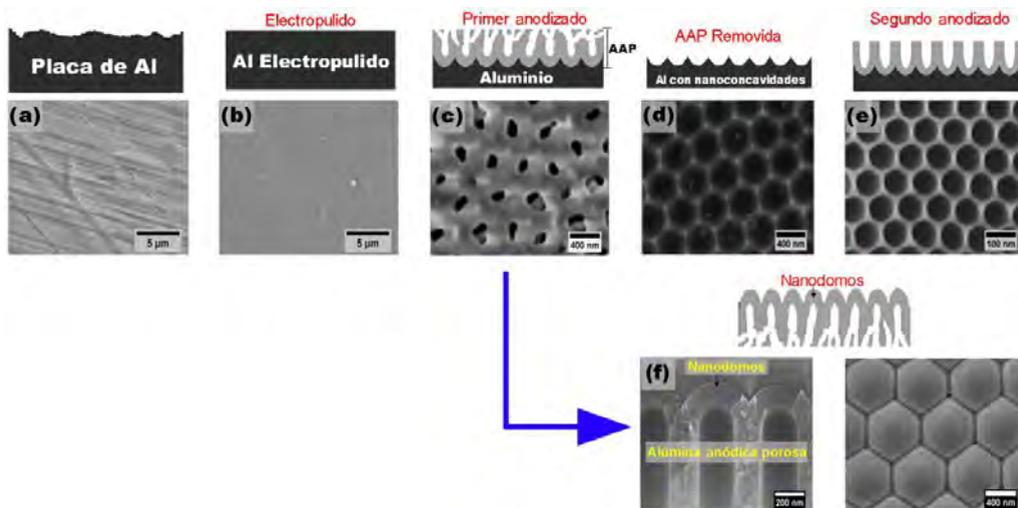
Fuente: Elaboración de los autores.

En la figura 2 se presenta, de manera general, el procedimiento estándar para la obtención de una película de AAP sobre la superficie del aluminio metálico. La figura 2(a) muestra la superficie del aluminio después de la limpieza y pre-tratamientos; la 2(b), la superficie del aluminio después del pulido electroquímico; la figura 2(c), la parte superior de la película de AAP después del primer anodizado donde se evidencia el arreglo desordenado de nanoporos; la 2(d), la superficie del aluminio después de eliminar selectivamente la AAP. Dicha superficie metálica queda marcada con un arreglo de nanoconcavidades que sirven como puntos de nucleación para el crecimiento de una nueva película de AAP con poros ordenados. La figura 2(e) corresponde a la película de AAP después de un segundo anodizado, y la 2(f), a la sección transversal (izquierda) y parte inferior (derecha) de la película de AAP después de eliminar selectivamente el aluminio, la base de los poros se muestra como un arreglo de nanodomos altamente ordenados.

Modulación del tamaño y disposición de poros en la AAP

Las películas de AAP sintetizadas por anodización electroquímica se han vuelto extremadamente populares durante los últimos años, pues han servido como moldes multifuncionales para la fabricación de diversas estructuras a escala nanométrica (Sulka, 2008). En años recientes, se han realizado esfuerzos sustanciales para ampliar el intervalo en la D_{int} , o bien, incrementar el D_p , sin alterar demasiado el orden y la organización del arreglo de los nanoporos, ya

FIGURA 2. Etapas de un proceso típico de doble anodizado. Las imágenes superiores muestran una representación esquemática del procedimiento experimental para la síntesis de plantillas de AAP, mientras que las imágenes inferiores muestran las micrografías SEM del material real obtenido.



Fuente: Elaboración de los autores.

que para algunas aplicaciones resulta ser un factor crucial el conservar un alto grado de regularidad y uniformidad (Masuda, 2005; Wehrspohn, 2005). La distribución del D_p y la D_{int} se pueden modular en función de diversos parámetros experimentales durante el anodizado electroquímico del aluminio. Por otro lado, se ha demostrado que el espesor de la t_b , determina el tamaño de la celda y del poro. También se ha encontrado experimentalmente que el D_p y la D_{int} son directamente proporcionales al potencial de anodizado, así como la poca influencia que tiene la concentración y el tipo de electrolitos en el D_p . Sin embargo, en los procesos de anodizado convencionales (15-200 V), es posible obtener D_{int} en intervalos limitados dentro de 60-500 nm (Masuda *et al.*, 1997; Li *et al.*, 1998; Jessensky *et al.*, 1998; Nielsch *et al.*, 2002; Zaraska *et al.*, 2014); mientras que el uso de altos voltajes (mayores a 400 V) ofrecen la posibilidad de obtener D_{int} entre 884-2036 nm (Chen *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2013).

Aunque la mayoría de las películas de AAP sintetizadas con altos voltajes tienen buena reproducibilidad y confiabilidad, todavía existen algunos problemas: los procesos de anodización requieren, generalmente, tiempos extremadamente largos (mayores a 24 h) para obtener una disposición de poros altamente ordenados. También es necesario el uso de sistemas de enfriamiento complejos para mantener bajas temperaturas (menores a 0 °C) y mantener las condiciones de anodización estables. Es bien sabido que al aplicar voltajes altos (mayores a 200 V) durante un proceso de anodización, estos generan calor muy rápidamente causado por los campos eléctricos intensos, dando como resultado quemaduras o grietas macroscópicas observables en la superficie de la AAP debido a las reacciones químicas presentes ante los campos eléctricos intensos. Además, dan lugar a arreglos de poros más desordenados, es decir, mientras más alto sea el voltaje de anodizado mayor será el desorden de los poros. Debido a este hecho, la fabricación rápida y mecánicamente estable de películas de AAP usando voltajes altos sigue siendo un gran desafío.

Entre los electrolitos más comúnmente usados para conseguir D_{int} entre 50 y 600 nm usando potenciales de anodizado de hasta 400 V se encuentran: el ácido fosfórico (H_3PO_4) (Li *et al.*, 2006; Masuda *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2010), malónico ($C_4H_6O_6$) (Knörnschild *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2013), cítrico ($C_6H_8O_7$) (Chen *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2013), acetilendicarboxílico o butinodioico ($C_4H_2O_4$) (Kikuchi *et al.*, 2014a), selénico (H_2SeO_4) (Akiya *et al.*, 2015; Kikuchi *et al.*, 2014b; Nazarkina *et al.*, 2015; Nazarkina *et al.*, 2017; Nishinaga *et al.*, 2013), etidróico (Kikuchi *et al.*, 2015 y 2017), entre otros. Al aumentar el potencial de anodizado superior a los 400 V, se ha optado por utilizar electrolitos a base de mezclas de ácidos y alcoholes los cuales actúan como difusores de calor en la celda electroquímica (Chen *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2013). En las figuras 3 y 4 se muestran imágenes de arreglos regulares de poros y domos de la capa barrera a diferentes voltajes de anodizado, respectivamente, en donde se utilizaron mezclas de diferentes ácidos, tales como el oxálico ($C_2H_2O_4$), fosfórico (H_3PO_4)

y cítrico ($C_6H_8O_7$) con etilenglicol (EG) (González-Campuzano *et al.*, 2017 y 2019). Los factores que influyen en la regularidad de los arreglos nanométricos durante el proceso de síntesis electroquímica empiezan con el corte de las láminas de aluminio (de 0.25 mm de espesor y 99.999% de pureza), las cuales se someten a un tratamiento estandarizado de limpieza, liberación de esfuerzos mecánicos y acabado a espejo que garantiza la uniformidad y homogeneidad cristalina en la superficie metálica previo al proceso de anodizado electroquímico. La secuencia de pasos y su justificación es como sigue: la limpieza inicial de las placas de aluminio con acetona es para retirar residuos de grasa y polvo. Con el fin de aumentar el tamaño de grano y liberar esfuerzos mecánicos presentes debido al proceso de laminado y corte de las piezas de aluminio, se realiza un tratamiento térmico (llamado recocido) a 600 °C durante 6 h en una atmósfera de H_2 a presión atmosférica. Posteriormente, se elimina el óxido nativo y contaminantes orgánicos que pudieran formarse en la superficie del aluminio posterior al proceso de recocido, usando una disolución 0.25 M de carbonato de sodio (Na_2CO_3) a 80 °C durante 3 minutos. Luego se realiza un proceso para neutralizar la superficie del aluminio, usando una disolución de ácido nítrico (HNO_3) al 35% en peso durante 30 s. Subsecuentemente, las placas son electropulidas en una celda electroquímica usando como contra electrodo una placa de grafito y una mezcla de ácido perclórico ($HClO_4$) al 70% en peso, y etanol (C_2H_6O) en una proporción 1:5 V/V, aplicando un voltaje constante de 18 V durante 2 minutos manteniendo una temperatura de 3 °C. Por último, las muestras son limpiadas secuencialmente con acetona, etanol y, finalmente, con agua desionizada mediante ultrasonificación durante 15 minutos para posteriormente dar inicio al proceso de anodizado. El voltaje de anodización y el electrolito correspondiente se muestran en la tabla 1. Debido a los altos voltajes que se utilizan, se adiciona EG, que actúa como difusor de calor en la celda electroquímica ayudando a reducir efectos de ruptura por quemaduras de la película de alúmina durante la reacción química exotérmica en el anodizado.

La celda electroquímica usada para el proceso de anodizado es colocada en un baño térmico con agua a temperatura ambiente para mantenerla constante durante 24 h. La placa de grafito y la placa de aluminio (contraelectrodo y electrodo) se colocan a una distancia fija de separación de 1 cm, con el fin de mantener el mismo campo eléctrico formado entre las placas debido al potencial aplicado. Las disoluciones se agitan continuamente para homogeneizar tanto la concentración del electrolito como la temperatura en la superficie de trabajo que se encuentra en contacto con el electrolito. Se utiliza una fuente de poder DC ajustable con un intervalo de voltajes entre 0 y 600 V, y un intervalo de corrientes entre 0 y 0.5 A (BK PRECISION modelo 9185B). Para evitar problemas de sobrecarga en la fuente, cuando se trabaja con voltajes altos de anodizado, se procede con aumentos graduales del voltaje evitando rebasar el límite de corriente eléctrica soportada por la fuente. Estos aumentos se realizan por pasos hasta alcanzar el voltaje final de anodizado, teniendo especial

precaución en mantener una corriente constante en el estado estacionario de crecimiento de la película de alúmina porosa.

TABLA 1. Voltajes y electrolitos utilizados para la fabricación de las membranas de AAP por medio de anodizado electroquímico de aluminio.

Voltaje (V)	Electrolito
40	100 ml de $H_2C_2O_4$ (0.3 M)
100	100 ml de H_3PO_4 (0.1 M)
150	80 ml de H_3PO_4 (0.1 M) + 20 ml de EG
200	60 ml de H_3PO_4 (0.05 M) + 25 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M) + 40 ml de EG
250	80 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 20 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M)
300	20 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 80 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M)
350	20 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 40 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M) + 50 ml de EG
400	15 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 40 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M) + 50 ml de EG
450	10 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 40 ml de $C_6H_8O_7$ (1 M) + 50 ml de EG
500	3 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 45 ml de $C_6H_8O_7$ (0.5 M) + 45 ml de EG
550	1 ml de H_3PO_4 (0.01 M) + 50 ml de $C_6H_8O_7$ (0.1 M)+50 ml de EG
600	50 ml de $C_6H_8O_7$ (0.1 M) + 50 ml de EG

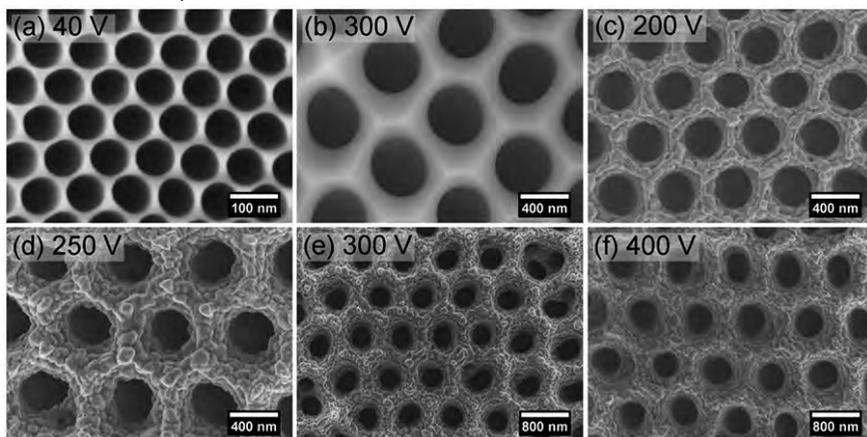
Fuente: González-Campuzano *et al.* (2017 y 2019).

Una vez terminado el proceso de anodizado, las muestras se limpian con agua desionizada mediante ultrasonificación durante 15 minutos. Aunque los parámetros elegidos para el anodizado aseguran un crecimiento regular de los poros en la AAP, sobre todo para tiempos de crecimiento prolongados, siempre es necesario realizar un proceso denominado anodizado de dos pasos, o proceso de doble anodizado. El procedimiento consiste en retirar la película de alúmina porosa formada en el primer anodizado, usando una mezcla de ácido fosfórico (H_3PO_4) al 6% en peso, y trióxido de cromo (CrO_3) al 1.8% en peso a 60 °C durante 12 h. Con este ataque selectivo de la película porosa se conservan las marcas en la superficie del aluminio, que corresponden a la forma inversa de la parte inferior de las celdas que constituyen el arreglo de poros, a estas nanoestructuras se les denomina nanoconcavidades (figura 2(d) y figura 5). Estas estructuras sirven como zonas de nucleación para el crecimiento de la nueva película porosa en el segundo proceso de anodizado. Este último se realiza bajo las mismas condiciones que el primero. La figura 2 esquematiza todas las etapas del método de anodización de dos pasos. El resultado del segundo anodizado mejora bastante el ordenamiento desde las primeras etapas de crecimiento en estas películas porosas y evita la generación de esfuerzos o tensiones mecánicas en el arreglo de las celdas de alúmina que se van formando en un espacio geométrico ya definido.

Finalmente, una vez formada la película de AAP mediante un segundo anodizado, el D_p queda definido por las condiciones del anodizado (voltaje de trabajo, temperatura, concentración y tipo de electrolito). Sin embargo, este no es el único factor que puede definir el diámetro de poro final, también se puede modificar este valor mediante un ataque químico selectivo de

nominado ensanchamiento de poro, usando una disolución 0.5 M de H_3PO_4 a 45 °C. Dependiendo de la naturaleza de la AAP se varía el tiempo de ataque. En nuestro caso se requirieron entre 30 y 60 minutos. Este proceso disuelve la pared de los poros de forma preferencialmente radial, haciendo que el diámetro de los mismos aumente al eliminar el material del que está constituida la pared del poro (figura 3).

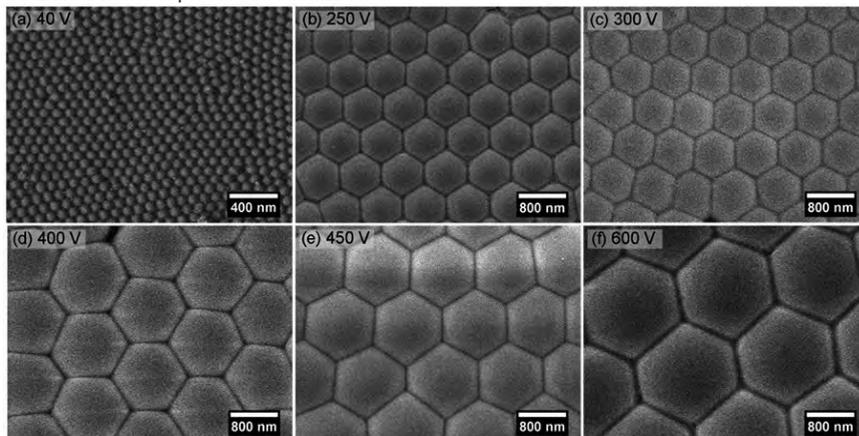
FIGURA 3. Micrografías SEM de la vista superior de películas de AAP evidenciando nanoporos altamente ordenados después del proceso de anodizado de dos pasos. El valor del voltaje mostrado fue el utilizado durante el proceso de anodizado.



Fuente: Elaboración de los autores.

Los nanodomos (parte inferior de las celdas de AAP, correspondientes a la capa barrera) (figura 4) son sintetizados utilizando una variante del proceso de anodizado de dos pasos. Para ello, después del primer anodizado, se elimina el aluminio que aún queda sin anodizar y sirve de soporte a la película de AAP. Como la disposición experimental de la celda electroquímica utilizada en nuestros experimentos permite anodizar ambas caras de la placa de aluminio, el procedimiento es como sigue: para eliminar el sustrato metálico, primero se disuelve la película porosa de la cara opuesta a la de interés empleando una disolución de 2.5 M de hidróxido de sodio (NaOH) a temperatura ambiente. Una vez expuesto el aluminio, se elimina mediante un ataque electroquímico con una disolución al 20% en peso de ácido clorhídrico (HCl). Como contra electrodo, se utiliza una placa de grafito y se aplica una diferencia de potencial entre 1 y 5 V, a temperatura ambiente. La diferencia de potencial aplicada durante el proceso acelera la reacción entre los iones de cloro y el aluminio metálico sin atacar al óxido de aluminio en la película porosa que se encuentra en la cara posterior (capa barrera). Por último, se limpia la superficie con el arreglo de nanodomos mediante un ataque químico que elimina el aluminio residual usando una mezcla de ácido clorhídrico HCl al 20% en peso y cloruro de cobre ($CuCl_2$) 0.5 M a temperatura ambiente.

FIGURA 4. Micrografías SEM de la vista superior de películas de AAP evidenciando nanodomos altamente ordenados posterior a la disolución selectiva del aluminio. El valor del voltaje mostrado fue el utilizado durante el proceso de anodizado.

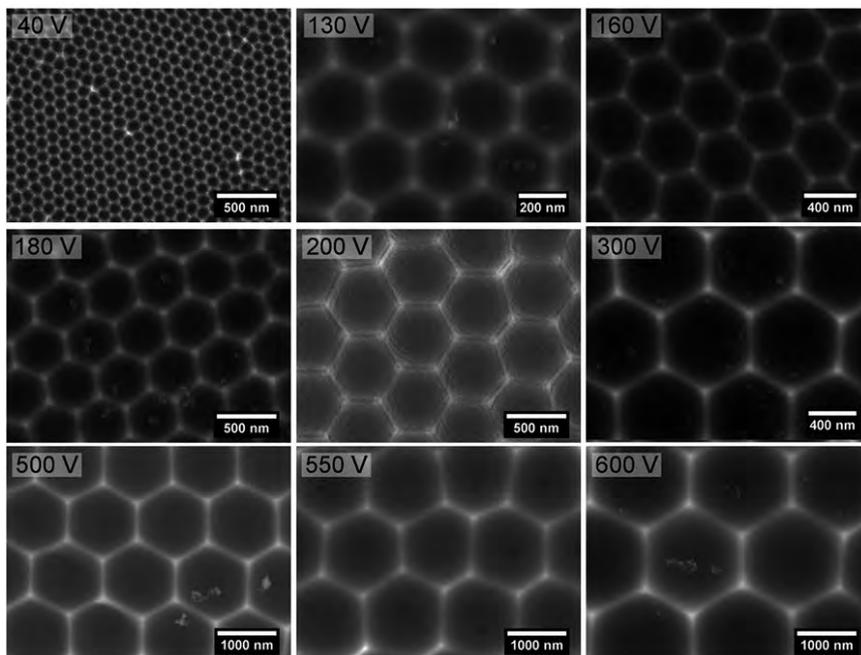


Fuente: Elaboración de los autores.

Como se mencionó anteriormente y resumiendo, además de las nanoestructuras porosas y los nanodomos que resultan del arreglo geométrico de las celdas de AAP, existen otro tipo de nanoestructuras que corresponden al arreglo geométrico formado en la superficie del aluminio después del primer anodizado, denominadas nanoconcauidades como las mostradas en las figuras 2(f) y 5. Estas se forman en la superficie del aluminio después de disolver selectivamente la AAP. Los parámetros que caracterizan a estas nanoestructuras (nanoporos, nanodomos y nanoconcauidades) son el diámetro de poro, nanoconcauidad y nanodomo (D_p), así como la distancia interporo, interconcauidad e interdomo (D_{int}). Estos parámetros son función del potencial de anodizado aplicado como se muestran en la figura 6. En dicha figura se observa que el tamaño de estas nanoestructuras depende del potencial aplicado, manteniendo una relación lineal entre ambos parámetros. Es por ello que el proceso de anodizado electroquímico del aluminio, en comparación con otras técnicas costosas como la litografía, es una buena alternativa porque permite obtener nanoestructuras con dimensiones deseadas al elegir apropiadamente el electrolito y el potencial de anodizado (Wehrspohn *et al.*, 2005; Zaraska *et al.*, 2015).

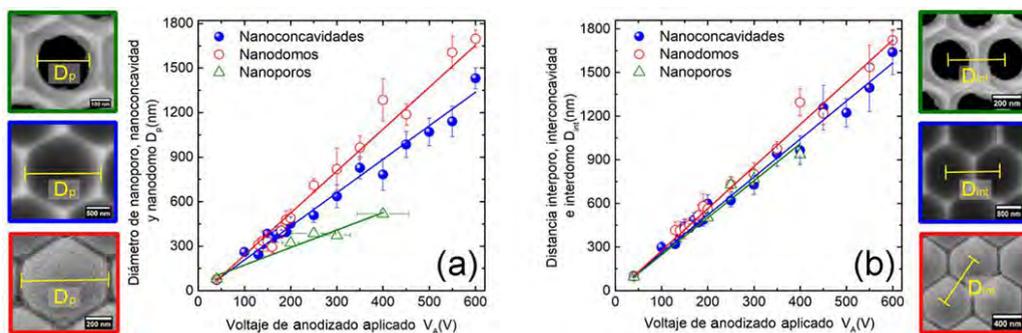
El panorama de las posibles aplicaciones que brindaría una membrana cerámica de AAP con un amplio intervalo en la modulación del tamaño de poro mayor a los 600 nm, es de gran interés tecnológico en áreas de la ciencia e ingeniería de materiales. La mayor parte de este interés se basa en sus destacadas propiedades físicas y químicas y, más concretamente, en sus propiedades ópticas. La interacción de la luz con la AAP da lugar a una gran cantidad de propiedades ópticas que tienen su interés tanto a nivel de investigación como de aplicación. Por ejemplo, Leung *et al.* (2012) han demostrado que las membranas de AAP correctamente modificadas (con dimensiones de poro de

FIGURA 5. Micrografías SEM de la vista superior de las nanoconcauidades altamente ordenadas, formadas en la superficie del aluminio, posterior a la disolución selectiva de la AAP. El valor del voltaje mostrado fue el utilizado durante el proceso de anodizado.



Fuente: Elaboración de los autores.

FIGURA 6. Relación entre los parámetros geométricos y el voltaje de anodizado aplicado (V_A) para las diferentes nanoestructuras obtenidas a partir de la AAP. (a) Diámetro de nanoporo, nanoconcauidad y nanodomo (D_p) vs V_A ; (b) distancia interporo, interconcauidad e interdomo (D_{int}) vs V_A .



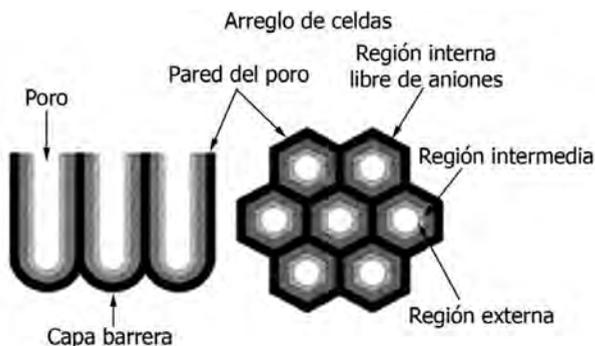
Fuente: Elaboración de los autores.

~700 nm) pueden ser utilizadas como recolectores de luz eficientes en el intervalo de longitud de onda de 700 nm. Es por ello que la modulación del tamaño de poro es crucial para determinadas aplicaciones.

Composición química de las celdas del óxido de aluminio anódico poroso

El mecanismo de crecimiento de las AAP en electrolitos ácidos se basa principalmente en un equilibrio entre la formación de óxido de aluminio, impulsado por el campo eléctrico, intensificado en la interfaz óxido/metal en la base del poro y la disolución de óxido en la interfaz óxido/electrolito (figura 7). Cuando el aluminio se oxida anódicamente, los iones del electrolito son incorporados desde la base de los poros y los aniones migran a través de la película de alúmina formada por acción del campo eléctrico aplicado. Bajo las condiciones del mecanismo de crecimiento de la capa porosa, el campo eléctrico deja de ejercer acción en la migración de los aniones al alejarse de la base de los poros. De esta manera los aniones incorporados pasan a formar parte de óxido anódico que forma la pared de los poros (Thompson y Wood, 1981).

FIGURA 7. Ilustración esquemática de la sección transversal vertical (izda.) y vista superior (dcha.) de un arreglo de celdas de AAP. Se muestran las zonas o regiones diferenciadas por el contenido de los iones derivados del electrolito utilizado durante el anodizado del aluminio.



Fuente: Elaboración de los autores.

El resultado de este proceso es la formación de tres regiones diferenciadas por el contenido de los iones derivados del electrolito utilizado durante el anodizado electroquímico del aluminio. La base y la pared de los poros están constituidas por un porcentaje de alúmina relativamente pura (región interna), otro porcentaje de alúmina contaminada con aniones, con un máximo local intermedio (región intermedia) y un porcentaje de alúmina, que además de aniones, contiene protones y moléculas de agua (región externa), como se observa esquemáticamente en la figura 7. La cantidad de las especies aniónicas incorporadas y su distribución en el óxido anódico de las celdas dependen del potencial de anodizado (V_A), la densidad de corriente (j), la temperatura (T), así como también del tipo y concentración de los electrolitos (Lee y Park, 2014).

Estabilidad térmica se las AAP

Antes de hablar de las características térmicas de la AAP, es necesario mencionar aspectos generales de los óxidos de aluminio y su estructura cristalina. El sistema aluminio/oxígeno presenta una extensa variedad de estructuras de alúmina metaestable, que pueden ser identificadas como arreglo de cationes aluminio ordenados, o parcialmente ordenados, en los sitios intersticiales de una subred de oxígenos con un empaquetamiento aproximadamente compacto. El arreglo de los iones oxígeno se puede dividir en dos amplias categorías: las alúminas cúbicas centradas en las caras o alúminas de empaquetamiento hexagonal compacto. La distribución de los cationes dentro de cada subgrupo da origen a las diferentes formas del óxido de aluminio identificadas con letras griegas (Wefers y Misra, 1987). Las estructuras del óxido de aluminio con base en el empaquetamiento cúbico centrado en las caras incluyen las formas: γ , η (cúbicas), θ (monoclínica), y la δ (ya sea tetragonal u ortorrómbica); mientras que las estructuras de alúmina con base en el empaquetamiento hexagonal compacto están representadas por las formas: α (trigonal), κ (ortorrómbica) y la χ (hexagonal) (Levin y Brandon, 1998). Al seguir la nomenclatura Alcoa (Wefer y Misra, 1987), a excepción de la fase termodinámicamente estable α -Al₂O₃, los demás óxidos de aluminio se les conoce como *alúminas de transición*, pues a partir de tratamientos térmicos cada una de las formas identificadas, son etapas de una continua transición entre estructuras cristalinas metaestables, hasta llegar a la fase estable corindón. En particular, las alúminas de transición formadas a bajas temperaturas contienen iones hidroxilo, la secuencia de transición no es reversible, es decir, ninguna α -Al₂O₃ o cualquiera de las formas presentes a alta temperatura pueden ser convertidas a una de las alúminas de transición que aparecen a bajas temperaturas. Otro aspecto importante es que la microestructura del material de partida determina el tipo de secuencia de las transformaciones en el curso del tratamiento térmico (Levin y Brandon, 1998). En la tabla 2, se presentan algunas de las secuencias de transformación de diversos precursores que conducen a la fase α -Al₂O₃, adicionalmente también se indica las temperaturas aproximadas a las cuales se forman las diferentes fases cristalinas.

Una vez establecido lo anterior, es conveniente recordar, de las secciones anteriores, que la AAP incorpora aniones producto de la reacción de anodizado en la celda electroquímica. La distribución y concentración dentro de la estructura del óxido de aluminio anódico de estos aniones depende de los parámetros experimentales en el proceso del anodizado. Como se mencionó anteriormente, se pueden identificar tres regiones: una zona de alúmina de alta pureza en la capa interna adyacente a la interface óxido/metal; una capa de óxido de aluminio intermedia constituida por aniones y una capa externa, adyacente a la interface óxido/electrolito formada por aniones, protones y moléculas de agua. Por tanto, es de esperar que la estabilidad térmica y resistencia química

de las AAP, se vea afectada por el perfil de distribución de los aniones en la estructura del óxido de aluminio anódico.

TABLA 2. Estructuras y secuencias de transformación en los oxohidróxidos e hidróxidos de aluminio metaestables generados por diferentes rutas de partida.

hcp	$\alpha\text{-AlOOH}$ (diáspora) $\xrightarrow{700-800\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ (gibbsite) $\xrightarrow{150-300\text{ }^{\circ}\text{C}}$ χ $\xrightarrow{650-750\text{ }^{\circ}\text{C}}$ κ $\xrightarrow{1000\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (tohdita) $\xrightarrow{700-800\text{ }^{\circ}\text{C}}$ κ' $\xrightarrow{750\text{ }^{\circ}\text{C}}$ κ $\xrightarrow{900\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ Vapor (CVD) $\rightarrow \kappa \rightarrow \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
fcc	$\gamma\text{-AlOOH}$ (bohemita) $\xrightarrow{300-500\text{ }^{\circ}\text{C}}$ γ $\xrightarrow{700-800\text{ }^{\circ}\text{C}}$ δ $\xrightarrow{900-1000\text{ }^{\circ}\text{C}}$ θ $\xrightarrow{1000-1100\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ (bayerita) $\xrightarrow{200-300\text{ }^{\circ}\text{C}}$ η $\xrightarrow{600-800\text{ }^{\circ}\text{C}}$ θ $\xrightarrow{1000-1100\text{ }^{\circ}\text{C}}$ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Fuente: Adaptación de Levin y Brandon (1998).

A mediados de los años noventa del siglo pasado, se iniciaron una serie de estudios para analizar la composición y estructura de la AAP empleando técnicas de análisis térmico, complementadas con espectroscopía infrarroja y difracción de rayos-X. La técnica de análisis térmico diferencial (DTA, differential thermal analysis, por sus siglas en inglés) mide la diferencia en temperatura entre la muestra y un material de referencia inerte, en función de la temperatura. La técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC, differential scanning calorimetry, por sus siglas en inglés) mide el flujo de calor que es necesario suministrar a la muestra para mantenerla a temperatura idéntica a un material de referencia. Los picos endotérmicos y exotérmicos observados en las gráficas durante el tratamiento térmico usado en esta técnica pueden ser atribuidos a diferentes procesos, como la descomposición del material, la transformación de fases cristalinas, puntos de fusión, transiciones vítreas, entre otros. La identificación de estos procesos se puede realizar con el apoyo de técnicas como la difracción de rayos-X. El análisis termogravimétrico (TGA, thermogravimetric analysis, por sus siglas en inglés) mide la pérdida de masa al ir incrementando la temperatura, si a esta técnica se acopla un espectrómetro de absorción infrarrojo, es posible identificar alguno de los compuestos que son liberados por efecto de la descomposición del material al incrementar la temperatura (Wunderlich, 1990).

Estudios, como los de Mardilovich y Ozao (Mardilovich *et al.*, 1995; Ozao *et al.*, 2000, 2001a,b, 2002, 2003), establecieron que en las AAP ocurren una serie

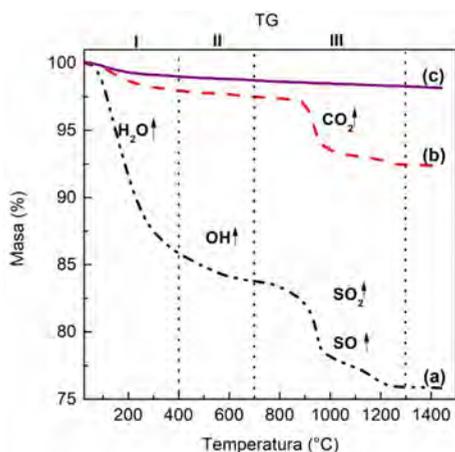
de etapas durante el tratamiento térmico en las que se ve involucrada la descomposición de las especies aniónicas incorporadas en el material y la secuencia de transformación de la alúmina amorfa a las alúminas de transición. La descripción del mecanismo de transformación resulta complejo, pues además intervienen los parámetros experimentales considerados en las técnicas del análisis térmico; tales como el programa de calentamiento, velocidad de calentamiento, el tipo de atmosfera (inerte, oxidante o reductora) y flujo del gas de arrastre (Ozao *et al.*, 2000 y 2001a,b). No obstante, con el acoplamiento simultáneo de técnicas espectroscópicas como la absorción infrarroja, resonancia magnética nuclear (NMR, nuclear magnetic resonance) o técnicas como TG-MS (thermogravimetry-mass spectrometry), TG-DTA, TPD-MS (temperature programmed desorption-mass spectrograph), difracción de rayos-X (DRX), termoanálisis, se ha podido llegar a cierto conocimiento del proceso que se lleva a cabo en la transformación de las AAP desde su estado amorfo inicial, hasta llegar a la fase corindón y la composición de las especies aniónicas incorporadas en la estructura inicial.

El esquema general propuesto en la evolución térmica se ha establecido en las AAP más utilizadas, formadas en electrólitos ácidos (ácido sulfúrico, oxálico y fosfórico). Los estudios realizados con las técnicas de termoanálisis simultáneo (TG-DSC o DTA) han mostrado que las pérdidas de masa se deben a la deshidratación (desde temperatura ambiente a los 400 °C), deshidroxilación (entre 400 °C-700 °C), y por arriba de los 700 °C hasta los 960 °C, la existencia de procesos colectivos en los que interviene la migración y pérdida de los aniones atrapados dentro del material, junto con el inicio de la formación de alúminas policristalinas (Mardilovich *et al.*, 1995; Ozao *et al.*, 2000, 2001a,b, 2002, 2003). A temperaturas por arriba de los 1100 °C, las transiciones exhiben picos exotérmicos (curvas DTA o DSC) atribuidos a la formación de las alúminas de transición γ , θ , δ (900 °C-1100 °C) y la fase más estable α -Al₂O₃ (1400 °C). El perfil de las curvas DSC en estos trabajos muestra que los picos exotérmicos, debidos a la transformación de la alúmina amorfa a una de las alúminas de transición, resulta ser más alta (entre 250 °C y 300 °C) que en las alúminas amorfas obtenidas por métodos químicos lo que se atribuye a que la presencia de los grupos aniónicos estabiliza la fase amorfa de la alúmina anódica, retardando la cristalización hasta que a una temperatura relativamente alta se da la transformación cristalina seguida por la descomposición de las especies aniónicas (Ozao *et al.*, 2003; Mata y Saniger, 2005).

El proceso dinámico de la cristalización es diferenciado entre las alúminas formadas en ácido sulfúrico y ácido oxálico, en relación con las alúminas formadas en ácido fosfórico. La formación de las alúminas de transición y la eliminación de las especies aniónicas son procesos acoplados en las alúminas formadas en ácido sulfúrico u oxálico (Ozao *et al.*, 2001a). Entre los 700 °C y 900 °C se producen cambios significativos de masa y energía producto de la transformación de la alúmina amorfa en policristalina. Las especies aniónicas, incorporadas durante el anodizado, se descomponen quedando atrapadas en

forma gaseosa en la matriz de alúmina, produciendo con esto la alteración de la estructura de las celdas que forman los poros. Durante esta etapa llamada de amorfización, el diámetro de los poros cambia presentando expansión y contracción en las dimensiones del poro al liberarse los gases producto de la descomposición de las especies aniónicas (Ozao *et al.*, 2002). A temperaturas más elevadas, la fase inicial policristalina, más la amorfa que aún prevalece, cristaliza en las formas metaestables. Inicia con la formación de la γ -alúmina y sigue con la coexistencia de las formas δ y θ -alúmina, hasta los 1100 °C. A pesar de la temperatura elevada, se puede detectar una cantidad menor de sulfatos y oxalatos que se van eliminando a medida que sigue aumentando la temperatura. Finalmente, se forma la fase α - Al_2O_3 , alrededor de los 1250 °C, libre de impurezas (Ozao *et al.*, 2000, 2001b).

FIGURA 8. Curvas termogravimétricas de: (a) AAP sulfúrica; (b) AAP oxálica, y, (c) AAP fosfórica. Se indican los procesos de: (I) la deshidratación; (II) la deshidroxilación, y, (III) la descomposición de las especies aniónicas presentes en el óxido de aluminio anódico.



Fuente: Mata y Saniger (2005).

A nivel microestructural, se ha investigado, con la técnica de resonancia magnética nuclear (^{27}Al aluminum NMR), cómo cambia la coordinación del aluminio a medida que incrementa la temperatura en la alúmina anódica. En las alúminas anódicas amorfas el aluminio se encuentra coordinado con el oxígeno en unidades de corto alcance formando tetraedros, pentaedros y octaedros (AlO_4 , AlO_5 y AlO_6) (Farman, 1989); con el incremento de la temperatura, se transita de la fase amorfa a las diferentes formas cristalinas de las alúminas de transición en las que prevalecen las coordinaciones AlO_4 y AlO_6 . Mientras que la coordinación AlO_5 va disminuyendo, debido al proceso de formación de las alúminas de transición y la eliminación de los aniones presentes en el material (Cho *et al.*, 2015). Al formarse las alúminas de transi-

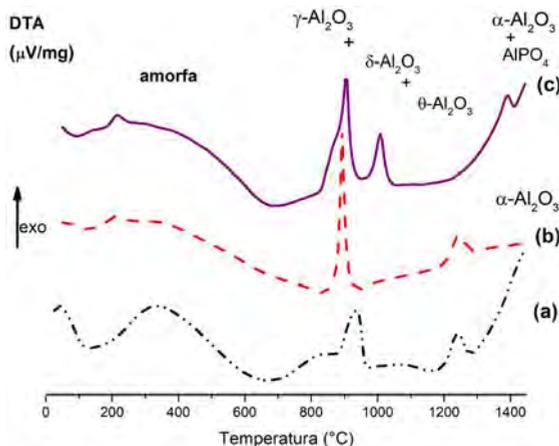
ción γ , δ , θ -alúminas las coordinaciones 4 y 6 se mantienen, ya que estas pertenecen a la simetría cúbica centrada en las caras (Kirchner *et al.*, 2007). Al alcanzar la temperatura de transición a la α -alúmina solo se encuentra la coordinación AlO_6 , que corresponde la simetría hexagonal compacta (Asoh *et al.*, 2015; Aman *et al.*, 2019).

En las gráficas de las figuras 8 y 9 se presentan, a manera de ejemplo, termogramas y curvas DTA de AAP formadas en los electrolitos más usados (ácidos sulfúrico, oxálico y fosfórico) y formadas en condiciones estándar de anodizado. Los voltajes, temperaturas y concentración de los electrolitos son los reportados para formar arreglos porosos uniformes (Nielsh *et al.*, 2002). También las condiciones del programa térmico de los equipos corresponden a parámetros estándar, intervalo de temperatura, razón de calentamiento, atmósfera, gas de arrastre. Es importante mencionar esto, ya que en la literatura no siempre se trabaja con los mismos valores y esto puede modificar las temperaturas a las que se dan los cambios de fase (Aman *et al.*, 2019; Norek *et al.*, 2015; Ozaio *et al.*, 2001a,b).

Como se puede observar en la figura 8, en las pérdidas de masa registradas en los termogramas destacan los procesos de deshidratación y deshidroxilación entre temperatura ambiente y los 650 °C. Entre los 700 °C y los 960 °C se observa la pérdida de masa debido a la descomposición de las especies aniónicas (SO_2 , CO_2). El porcentaje de pérdida de masa en cada proceso dependerá de la preparación de las alúminas anódicas (Mata y Saniger, 2005). En el caso de las AAP formadas en ácido fosfórico su comportamiento térmico es muy distinto, como se puede observar en la curva termogravimétrica casi no hay pérdida de masa (figura 8 (c)). Los resultados de la espectroscopía infrarroja muestran que el grupo fosfato permanece incorporado en la matriz de alúmina, esta diferencia probablemente está relacionada con la estabilidad térmica de los fosfatos en la matriz de alúmina, debido a la alta afinidad química de los fosfatos por el aluminio (Bocchetta *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2006; Mata y Saniger, 2005).

En la figura 9, se comparan las curvas del análisis térmico diferencial de las tres alúminas anódicas. En las curvas se muestran los cambios que ocurren durante los procesos de deshidratación, deshidroxilación, descomposición de las especies aniónicas, junto con los cambios de fase de las alúminas anódicas. Los picos endotérmicos por abajo de los 400 °C se atribuyen a los procesos de deshidratación y deshidroxilación. Entre los 800 °C y 1100 °C se encuentra el proceso de descomposición de las especies aniónicas junto con los procesos de transformación de fase, picos exotérmicos. En el caso de las alúminas formadas en ácido sulfúrico y oxálico la fase α - Al_2O_3 se forma por arriba de los 1200 °C; mientras que para las AAP formadas en ácido fosfórico su comportamiento es diferente. Entre los 1200 °C y 1450 °C se forman las fases α - Al_2O_3 y puesto que el grupo fosfato permanece incorporado en la matriz de alúmina, el fosfato de aluminio ($AlPO_4$) coexiste como una segunda fase con la α -alúmina cristalina (Bocchetta *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2006; Mata y Saniger, 2005).

FIGURA 9. Curvas del análisis térmico diferencial para: **(a)** AAP sulfúrica; **(b)** AAP oxálica y, **(c)** AAP fosfórica. Se indican las alúminas de transición frecuentemente formadas entre los 800 °C y 1200 °C. La α - Al_2O_3 se forma por arriba de los 1200 °C.



Fuente: Elaboración de los autores.

En reportes más recientes (Hashimoto *et al.*, 2018a), se ha estudiado la formación de una estructura de mesoporos en la pared de las celdas al ser eliminadas las nanopartículas de fosfato de aluminio con el tratamiento térmico adecuado. Cabe mencionar que la formación de los mesoporos también se puede encontrar en las alúminas que contienen oxalatos y sulfatos, pero a temperaturas más bajas (~ 1000 °C). Al incrementar la temperatura para formar la fase alfa-alúmina, los mesoporos son eliminados por acción de la sinterización del material de las paredes de las celdas (Roslyakov *et al.*, 2020).

En la tabla 3, se reporta la ruta de transformación de las alúminas de transición a partir de la AAP. Los intervalos de temperatura son valores promedio de diversos trabajos (Aman *et al.*, 2019; Asoh *et al.*, 2015; Bocchetta *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2006; Chang *et al.*, 2012; Cho *et al.*, 2015; Choudhari *et al.*, 2012; Hashimoto *et al.*, 2018; Kirchner *et al.*, 2007; Le Coz *et al.*, 2010; Mardilovich *et al.*, 1995; Masuda *et al.*, 2015; Mata y Saniger, 2005; Mc Quaig *et al.*, 2011; Ono *et al.*, 2014; Ozao *et al.*, 2000, 2001; Roslyakov *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2004).

En los trabajos más recientes (Chang *et al.*, 2012; Hashimoto *et al.*, 2018; Masuda *et al.*, 2015; Roslyakov *et al.*, 2020) relacionados con el tema de las membranas de α -alúmina porosa se investigan las condiciones más adecuadas para obtener membranas estables y resistentes al ataque químico de bases y ácidos. Se establece que la estructura y composición de las celdas que forman el arreglo de poros es determinante en la estrategia a seguir para conservar la estructura. Los retos a vencer son varios, entre ellos está el de eliminar los aniones de las regiones intermedia y externa de la pared de las celdas, sin afectar la capa interna formada de alúmina relativamente pura y compacta (fi-

gura 7). El segundo reto es no adelgazar el espesor de la pared de la celda durante el proceso de apertura y homogenización del diámetro superior e inferior de los poros. Otro reto es alcanzar un área extensa y plana de la membrana de α -alúmina porosa con resistencia mecánica y sin fracturas.

TABLA 3. Ruta de transformación de las alúminas de transición a partir de la AAP. +AAP-Oxálica. Anodizado a 150 V; ♦AAP-Oxálica. Anodizado entre 10 V y 130 V; *AAP-Oxálica. Anodizado a 130 V; **AAP-Fosfórica comercial (Wathman Anopore).

Transición (°C)	Amorfa $\rightarrow\gamma\rightarrow\delta\rightarrow\theta\rightarrow\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$			Referencia
AAP-sulfúrica	900	960-1240	1250	Ozao <i>et al.</i> (2000, 2001a); Mata y Saniger (2005); Kirchner <i>et al.</i> (2007).
	850	1150	1300	
AAP-oxálica	830-	1075-1100	1150	Mardilovich <i>et al.</i> (1995); ♦Lee <i>et al.</i> (2000); Bocchetta <i>et al.</i> (2003); Yang <i>et al.</i> (2003); Mata y Saniger (2005); Kirchner <i>et al.</i> (2008) +Xu <i>et al.</i> (2004); McQuaig <i>et al.</i> (2011) Ono <i>et al.</i> (2014). Cho <i>et al.</i> (2015); Masuda <i>et al.</i> (2015); Aman <i>et al.</i> (2019).*
	840	870	1200	
		870	1219	
		903	1400	
		1100	1210	
	800	912	1100	
		800-950	1200	
	870		1200	
	870		1200	
	AAP-fosfórica		890	
700		920-1150	1450	
800-		850	1020-1300	
900		900-1100	1300-1400	

Fuente: Elaboración de los autores.

En las indicaciones generales sugeridas en los trabajos de Masuda (2015) y Roslyacov (2020), para mejorar las propiedades mecánicas de las membranas de α -alúmina, se recuperan varias consideraciones experimentales mencionadas desde hace varias décadas. Entre ellas: la preparación del aluminio con tratamientos de recocido térmico para eliminar las tensiones mecánicas y aumentar el tamaño de grano en la superficie del metal; trabajar en las condiciones óptimas de anodizado (voltaje, corriente, temperatura, concentración del electrolito) para obtener el mayor ordenamiento posible de poros; mejorar la simetría en las dimensiones del poro a lo largo de la celda, eliminando o reduciendo el espesor de la capa barrera, aplicando procedimientos electroquí-

micos al finalizar el anodizado; eliminar los aniones integrados a la AAP, por medio del ataque químico selectivo (Mardilovich, 1995; Jessensky *et al.*, 1998; Masuda *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2006; Ono *et al.*, 2014).

En la primera década de este siglo, la investigación ha tomado un enfoque más dirigido a cubrir aspectos importantes relacionados con el desarrollo tecnológico con el fin de obtener un material cerámico nanoporoso. El conocimiento más detallado de las regiones diferenciadas, presentes en la pared de la AAP, ha permitido desarrollar estrategias que toman en cuenta el conocimiento de los procesos dinámicos involucrados en la evolución de las fases policristalinas y la descomposición química de los aniones junto con los parámetros del tratamiento térmico implicado. Se ha establecido que una baja razón de calentamiento e inclusión de isoterms próximas a las temperaturas de descomposición de los aniones y/o de transición de fases son indispensables para evitar la acumulación de tensiones mecánicas en el material (Roslyakov *et al.*, 2020). Por el momento, los datos experimentales se han restringido a las AAP sintetizadas usando los tres electrolitos más comunes, sin embargo, se abre un campo de investigación y desarrollo tecnológico para continuar con las alúminas de poros extra grandes. Las condiciones de anodizado en este tipo de AAP son poco convencionales, empezando por los altos voltajes de anodizado (>200 V) y el empleo de mezcla de ácidos y alcoholes en los electrolitos utilizados.

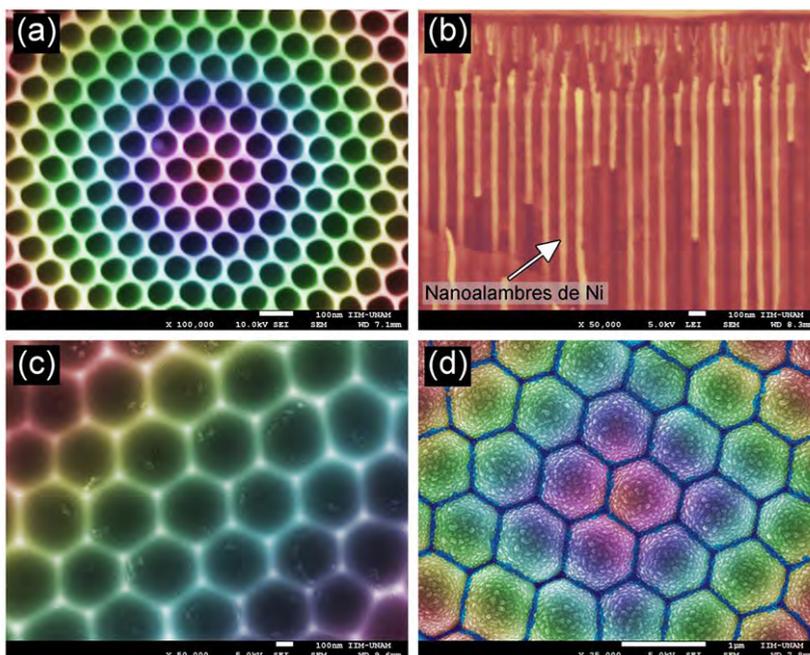
Nuevas aplicaciones potenciales de las AAP

Las películas de AAP sin tratamiento térmico ofrecen una amplia versatilidad para fabricar nanomateriales multifuncionales (Sousa *et al.*, 2014) como las mostradas en la figura 10 para algunas aplicaciones potenciales. En la superficie del arreglo de nanoporos se pueden depositar metales y formar sistemas con nanohuecos que presentan propiedades novedosas e interesantes en aplicaciones tecnológicas (figura 10a). Estos nanohuecos, en comparación con las películas continuas, pueden producir efectos cuánticos en su conductividad (Nakanishi y Ando, 1996; Uryu y Ando, 1998), transmisión óptica mejorada (Ebbesen *et al.*, 1998; Ruan y Qiu, 2006), propiedades plasmónicas (Schmidt *et al.*, 2014; Schwind, *et al.*, 2013), entre otros (Leitao *et al.*, 2013; Vavassori *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006). En la figura 10b se muestra un arreglo de nanoalambres de níquel (Ni) embebidos en los nanoporos sintetizados mediante electrodeposición. Este tipo de nanoestructuras unidimensionales (1D) poseen numerosas propiedades catalíticas (Riva *et al.*, 2019), magnéticas (Li *et al.*, 2020), termoeléctricas (Domínguez-Adame *et al.*, 2019), y ópticas (Quan *et al.*, 2019; Yao *et al.*, 2008). En las figuras 10c y 10d se muestran nanoconcavidades de aluminio y nanodomos de AAP, respectivamente. Recientemente, este tipo de nanoestructuras han adquirido gran interés debido a sus propiedades plasmónicas aprovechadas en la fabricación de sustratos para la detección de moléculas de interés químico y/o biológico (Celik *et al.*, 2018; González-Campuzano *et al.*, 2017; González-Campuzano *et al.*, 2018; Huang y Tsai, 2018; Wang *et al.*,

2012). También han servido como sustratos nanoestructurados para controlar propiedades plasmónicas de otros metales en diferentes intervalos de longitud de onda del espectro electromagnético (González-Campuzano y Mendoza, 2019; González-Campuzano *et al.*, 2020). Las AAP con tratamiento térmico podrían ampliar su funcionalidad en aplicaciones en las que se requiere soportar condiciones de alta temperatura o medios corrosivos.

Adicionalmente, pueden ser usadas como filtros debido a su capacidad para bloquear selectivamente diversos tipos de virus, pequeñas moléculas orgánicas, sales y otros iones metálicos peligrosos. Song *et al.* (2011) informan sobre la preparación de AAP para eliminar iones peligrosos de metales pesados de una solución acuosa. La estructura porosa de las membranas de AAP facilita una mejor aceptación de catalizadores, por lo que se han propuesto como soportes catalíticos (Stair *et al.*, 2006), e, incluso, se han propuesto en la separación de gases (Cho *et al.*, 2015) y en la fabricación de microsensores. Aprovechando su transparencia moderada y un bajo coeficiente de absorción, también podrían utilizarse en dispositivos relacionados con la energía y la óptica. De hecho, se han incorporado en la fabricación de dispositivos LCD (Hong *et al.*, 2010).

FIGURA 10. Micrografías SEM de diferentes nanoestructuras obtenidas a partir de las AAP: (a) arreglos de nanoporos; (b) nanoalambres; (c) nanoconcavidades, y, (d) nanodomos. Cabe aclarar que el falso color en las micrografías no tiene ningún significado particular, solo se utiliza con fines decorativos.



Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusiones

La anodización electroquímica del aluminio para la obtención de películas continuas o porosas de alúmina son actualmente objetos de una extensa investigación, con casi mil artículos publicados anualmente en el campo. En este manuscrito, se realizó una breve revisión acerca de la estructura y composición de las celdas de la AAP, así como de las rutas para conseguir membranas de α -alúmina mediante tratamientos térmicos adecuados para conservar el arreglo de poros. Aunque hay avances notables en comprender el efecto de los aniones incorporados durante el anodizado, aún se requiere de investigación en otro tipo de electrolitos y condiciones de anodizado no convencionales. El reto consiste en conocer la composición, distribución y efecto de los aniones incorporados en las nuevas condiciones (por ejemplo, usando altos voltajes), y plantear estrategias que permitan evaluar su efecto en las propiedades de estabilidad térmica del material poroso en su fase cristalina alfa. Este campo de investigación se encuentra en auge, aunque las bases del conocimiento de las propiedades estructurales, morfológicas y térmicas es el producto de una gran cantidad de trabajos dedicados al estudio del óxido de aluminio anódico poroso desde la década de los años 50s. En general, la motivación que surge por el interés sostenido durante tanto tiempo en las AAP, es que se las considera también como un material modelo, cuyas características morfológicas ofrecen gran versatilidad para la síntesis, caracterización y estudio de propiedades fisicoquímicas de diferentes nanoestructuras funcionales sin la necesidad de procesos costosos como la litografía; así como el desarrollo de aplicaciones rentables basadas en la amplia extensión de los arreglos ordenados que se pueden obtener.

Referencias

- Abdel-Karim, R. y El-Raghy, S. M. (2016). Fabrication of nanoporous alumina. En *Nanofabrication using nanomaterials*. One Central Press (OCP).
- Akiya, S., Kikuchi, T., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2015). Optimum exploration for the self-ordering of anodic porous alumina formed via selenic acid anodizing. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(10): E244-E250. <https://doi.org/10.1149/2.0391510jes>
- Aman, J. N., Wied, J. K., Alhusaini, Q., Müller, S., Diehl, K., Staedler, T., Schönherr, H. Jiang, X., Schmedt, auf der Günne J. (2019). Thermal hardening and defects in anodic aluminum oxide obtained in oxalic acid: implications for the template synthesis of low-dimensional nanostructures. *ACS Applied Nano Materials*, 2(4): 1986-1994. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b00018>
- Asoh, H., Masuda, T. y Ono, S. (2015). Nanoporous α -alumina membranes with pore diameters tunable over wide range of 30-350 nm. *ECS Transactions*, 69(2): 225. <https://doi.org/10.1149/06902.0225ecst>
- Bocchetta, P., Sunseri, C., Chiavarotti, G. y Di Quarto, F. (2003). Microporous alumina membranes electrochemically grown. *ElectrochimicaActa*, 48(20-22), 3175-

3183. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00348-7](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00348-7)
- Brown, I. W. M., Bowden, M. E., Kemmitt, T. y MacKenzie, K. J. D. (2006). Structural and thermal characterisation of nanostructured alumina templates. *Current Applied Physics* 6(3): 557-561. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2005.11.060>
- Celik, M., Altuntas, S. y Buyukserin, F. (2018). Fabrication of nanocrater-decorated anodic aluminum oxide membranes as substrates for reproducibly enhanced SERS signals. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255: 2871-2877. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.105>
- Chang, Y., Ling, Z., Liu, Y., Hu, X. y Li, Y. (2012). A simple method for fabrication of highly ordered porous α -alumina ceramic membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 22(15): 7445-7448. <https://doi.org/10.1039/C2JM15279G>
- Chen, X., Yu, D., Cao, L., Zhu, X., Song, Y., Huang, H., Lu, L. y Chen, X. (2014). Fabrication of ordered porous anodic alumina with ultra-large interpore distances using ultrahigh voltages. *Materials Research Bulletin*, 57: 116-120. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.05.037>
- Cho, S. Y., Kim, J. W. y Bu, S. D. (2015). Effects of impurities on phase transition changes according to heat treatment of porous anodic alumina fabricated in oxalic acid and phosphoric acid electrolytes. *Journal of the Korean Physical Society*, 66(9): 1394-1400. <https://doi.org/10.3938/jkps.66.1394>
- Choudhari, K. S., Sudheendra, P. y Udayashankar, N. K. (2012). Fabrication and high-temperature structural characterization study of porous anodic alumina membranes. *Journal of Porous Materials*, 19(6): 1053-1062. <https://doi.org/10.1007/s10934-012-9568-z>
- Domínguez-Adame, F., Martín-González, M., Sánchez, D. y Cantarero, A. (2019). Nanowires: A route to efficient thermoelectric devices. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 113: 213-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2019.03.021>
- Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Ghaemi, H. F., Thio, T. y Wolff, P. A. (1998). Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 391(6668): 667-669. <https://doi.org/10.1038/35570>
- Farnan, I., Dupree, R., Jeong, Y., Thompson, G. E., Wood, G. C. y Forty, A. J. (1989). Structural chemistry of anodic alumina. *Thin Solid Films*, 173(2): 209-215. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(89\)90136-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(89)90136-3)
- Gitzen, W. H. (1970). *Alumina as a ceramic material*. Alcoa Research Laboratories. The American Ceramic Society Inc. EUA.
- González-Campuzano, R., Martínez-Lara, D. E. y Mendoza, D. (2020). Lead plasmonics on texturized substrates: Pbmetafilms. *Applied Physics Letters*, 117(3): 031603. <https://doi.org/10.1063/5.0016131>
- González-Campuzano, R., Mata-Zamora, M. E., López-Romero, S. y Mendoza, D. (2018). Excitation of plasmonic resonances within UV-Vis wave length range using low-purity aluminum nanoconcave arrays. *Applied Physics Letters*, 113(22): 221604. <https://doi.org/10.1063/1.5059556>
- González-Campuzano, R., Saniger, J. M. y Mendoza, D. (2017). Plasmonic resonances in hybrid systems of aluminum nanostructured arrays and few layer gra-

- phene within the UV-IR spectral range. *Nanotechnology*, 28(46): 465704. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa8ce4>
- González-Campuzano, R. y Mendoza, D. (2019). Excitation of plasmons in self-ordered arrays of aluminum and silver nanoconcaves within UV-IR spectral range. *Journal of Physics: Conference Series*, 1221(1): 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1221/1/012001>
- Hashimoto, H., Kojima, S., Sasaki, T. y Asoh, H. (2018a). α -Alumina membrane having a hierarchical structure of straight macropores and mesopores inside the pore wall. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(4), 1836-1840. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.032>
- Hashimoto, H., Shigehara, Y., Ono, S. y Asoh, H. (2018b). Heat-induced structural transformations of anodic porous alumina formed in phosphoric acid. *Microporous and Mesoporous Materials*, 265, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.01.008>
- Hong, C., Tang, T. T., Hung, C. Y., Pan, R. P. y Fang, W. (2010). Liquid crystal alignment in nanoporous anodic aluminum oxide layer for LCD panel applications. *Nanotechnology*, 21(28): 285201. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/28/285201>. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.03.021>
- Huang, C. Y., Y Tsai, M. S. (2018). Fabrication of 3D nano-hemispherical cavity array plasmonic substrate for SERS applications. *International Journal of Optomechanics*, 12(1): 40-52. <https://doi.org/10.1080/15599612.2018.1508528>
- Jessensky, O., Müller, F. y Gösele, U. (1998). Self-organized formation of hexagonal pore arrays in anodic alumina. *Applied physics letters*, 72(10): 1173-1175. <https://doi.org/10.1063/1.121004>
- Kikuchi, T., Nishinaga, O., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2014a). Fabrication of anodic nanoporous alumina via acetylenedicarboxylic acid anodizing. *ECS Electrochemistry Letters*, 3(7): C25-C28. <https://doi.org/10.1149/2.0071407eel>
- Kikuchi, T., Nishinaga, O., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2014b). Self-ordering behavior of anodic porous alumina via selenic acid anodizing. *Electrochimica Acta*, 137: 728-735. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.06.078>
- Kikuchi, T., Nishinaga, O., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2015). Fabrication of self-ordered porous alumina via etidronic acid anodizing and structural color generation from submicrometer-scale dimple array. *Electrochimica Acta*, 156: 235-243. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.12.171>
- Kikuchi, T., Takenaga, A., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2017). Advanced hard anodic alumina coatings via etidronic acid anodizing. *Surface and Coatings Technology*, 326: 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.043>
- Kirchner, A., MacKenzie, K. J. D., Brown, I. W. M., Kemmitt, T. y Bowden, M. E. (2007). Structural characterisation of heat-treated anodic alumina membranes prepared using a simplified fabrication process. *Journal of Membrane Science*, 287(2): 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.10.045>
- Knörnschild, G., Poznyak, A. A., Karoza, A. G. y Mozalev, A. (2015). Effect of the anodization conditions on the growth and volume expansion of porous alumina films in malonic acid electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 275:

- 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.030>
- Le Coz, F., Arurault, L. y Datas, L. (2010). Chemical analysis of a single basic cell of porous anodic aluminium oxide templates. *Materials Characterization*, 61(3): 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.12.008>
- Lee, C. W., Kang, H. S., Chang, Y. H. y Hahm, Y. M. (2000). Thermo treatment and chemical resistance of porous alumina membrane prepared by anodic oxidation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 17(3): 266-272. <https://doi.org/10.1007/BF02699038>
- Lee, W. y Park, S. J. (2014). Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures. *Chemical Reviews*, 114(15): 7487-7556. <https://doi.org/10.1021/cr500002z>
- Leitao, D. C., Ventura, J., Teixeira, J. M., Sousa, C. T., Pinto, S., Sousa, J. B. Michalik, J. M., De Teresa, J. M., Vazquez, M. y Araujo, J. P. (2013). Correlations among magnetic, electrical and magneto-transport properties of Ni Fe nano hole arrays. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25(6): 066007. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/6/066007>
- Leung, S. F., Yu, M., Lin, Q., Kwon, K., Ching, K. L., Gu, L., ... y Fan, Z. (2012). Efficient photon capturing with ordered three-dimensional nanowell arrays. *Nano letters*, 12(7): 3682-3689. <https://doi.org/10.1021/nl3014567>
- Levin, I. y Brandon, D. (1998). Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(8): 1995-2012. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02581.x>
- Li, A. P., Müller, F., Birner, A., Nielsch, K. y Gösele, U. (1998). Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina. *Journal of applied physics*, 84(11): 6023-6026. <https://doi.org/10.1063/1.368911>
- Li, H., Long, Y., Wang, X., Song, G., Ma, L., Xu, H. y Li, X. (2020). Controllable fabrication and magnetic properties of Nd/Co core/shell nanowires. *Applied Nanoscience*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13204-020-01588-4>
- Li, Y., Zheng, M., Ma, L. y Shen, W. (2006). Fabrication of highly ordered nanoporous alumina films by stable high-field anodization. *Nanotechnology*, 17(20): 5101. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/20/010>
- Losic D., Santos A., (2015). *Nanoporous alumina. fabrication, structure, properties and applications*. Springer Series in Materials Science, Vol. 219, Springer. 10.1007/978-3-319-20334-8
- Ma, Y., Wen, Y., Li, J., Li, Y., Zhang, Z., Feng, C. y Sun, R. (2016). Fabrication of self-ordered alumina films with large interpore distance by janus anodization in citric acid. *Scientific Reports*, 6: 39165. <https://doi.org/10.1038/srep39165>
- Mardilovich, P. P., Govyadinov, A. N., Mukhurov, N. I., Rzhetskii, A. M. y Paterson, R. (1995). New and modified anodic alumina membranes. Part I. Thermotreatment of anodic alumina membranes. *Journal of Membrane Science*, 98(1-2): 131-142. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00184-Z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00184-Z)
- Mardilovich, P. P., Govyadinov, A. N., Mazurenko, N. I. y Paterson, R. (1995). New and modified anodic alumina membranes. Part II. Comparison of solubility of amorphous (normal) and polycrystalline anodic alumina membranes. *Journal of mem-*

- branesience*, 98(1-2):143-155. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(94\)00185-2](https://doi.org/10.1016/0376-7388(94)00185-2)
- Masuda H. (2005). Highly ordered nanohole arrays in anodic porous alumina. En *Ordered porous nanostructures and applications*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/0-387-25193-6_3
- Masuda, H., Hasegawa, F. y Ono, S. (1997). Self-ordering of cell arrangement of anodic porous alumina formed in sulfuric acid solution. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(5): L127-L130. <https://doi.org/10.1149/1.1837634>
- Masuda, H., Yada, K. y Osaka, A. (1998). Self-ordering of cell configuration of anodic porous alumina with large-size pores in phosphoric acid solution. *Japanese Journal of Applied Physics*, 37(11A): L1340. <https://doi.org/10.1143/JJAP.37.L1340>
- Masuda, T., Asoh, H., Haraguchi, S. y Ono, S. (2015). Fabrication and characterization of single phase α -alumina membranes with tunable pore diameters. *Materials*, 8(3): 1350- 1368. <https://doi.org/10.3390/ma8031350>
- Mata-Zamora, M. E. y Saniger, J. M. (2005). Thermal evolution of porous anodic aluminas: a comparative study. *Revista Mexicana de Física*, 51(5): 502-509.
- McQuaig, M. K., Toro, A., Van Geertruyden, W. y Misiolek, W. Z. (2011). The effect of high temperature heat treatment on the structure and properties of anodic aluminum oxide. *Journal of Materials Science*, 46(1): 243-253. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4966-6>
- Nakanishi, T. y Ando, T. (1996). Quantum interference effects in antidot lattices in magnetic fields. *Physical Review B*, 54(11): 8021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.8021>
- Nazarkina, Y., Gavrilov, S., Terryn, H., Petrova, M. y Ustarroz, J. (2015). Investigation of the ordering of porous anodic alumina formed by anodization of aluminum in selenic acid. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(9): E166-E172. <https://doi.org/10.1149/2.0571509jes>
- Nazarkina, Y., Kamnev, K., Dronov, A., Dudin, A., Pavlov, A. y Gavrilov, S. (2017). Features of porous anodic alumina growth in galvanostatic regime in selenic acid based electrolyte. *Electrochimica Acta*, 231: 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.049>
- Nielsch, K., Choi, J., Schwirn, K., Wehrspohn, R. B. y Gösele, U. (2002). Self-ordering regimes of porous alumina: the 10porosity rule. *Nano Letters*, 2(7): 677-680. <https://doi.org/10.1021/nl025537k>
- Nishinaga, O., Kikuchi, T., Natsui, S. y Suzuki, R. O. (2013). Rapid fabrication of self-ordered porous alumina with 10-/sub-10-nm-scale nanostructures by selenic acid anodizing. *Scientific Reports*, 3: 2748. <https://doi.org/10.1038/srep02748>
- Norek, M., Dopierała, M. y Stępniewski, W. J. (2015). Ethanol influence on arrangement and geometrical parameters of aluminum concaves prepared in a modified hard anodization for fabrication of highly ordered nanoporous alumina. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 750: 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.05.024>
- Ono, S., Nakamura, M., Masuda, T. y Asoh, H. (2014). Fabrication of nanoporous crystalline alumina membrane by anodization of aluminum. *Materials Science*

- Forum*, 783: 1470-1475. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.1470>
- Ozao, R., Ochiai, M., Ichimura, N., Takahashi, H. e Inada, T. (2000). DSC study of alumina materials–applicability of transient DSC (Tr-DSC) to anodic alumina (AA) and thermoanalytical study of AA. *Thermochimica Acta*, 352: 91-97. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00443-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00443-8)
- Ozao, R., Ochiai, M., Yoshida, H., Ichimura, Y. e Inada, T. (2001a). Preparation of γ -alumina membranes from sulphuric electrolyte anodic alumina and its transition to α -alumina. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 64(3): 923-932. <https://doi.org/10.1023/A:1011518929708>
- Ozao, R., Yoshida, H. e Inada, T. (2002). Morphological and structural change of nano-pored alumina membrane above 1200 K. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 69(3): 925-931. <https://doi.org/10.1023/a:1020624526552>
- Ozao, R., Yoshida, H., Ichimura, Y., Inada, T. y Ochiai, M. (2001b). Crystallization of anodic alumina membranes studied by simultaneous TG-DTA/FTIR. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 64(3): 915-922. <https://doi.org/10.1023/a:1011566811961>
- Ozao, R., Yoshida, H., Inada, T. y Ochiai, M. (2003). Sulfur concentration in nanoporous alumina membrane. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 72(1): 113-118. <https://doi.org/10.1023/a:1023959401129>
- Quan, L. N., Kang, J., Ning, C. Z. y Yang, P. (2019). Nanowires for photonics. *Chemical Reviews*, 119(15): 9153-9169. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00240>
- Riva, J. S., Juárez, A. V., Urreta, S. E. y Yudi, L. M. (2019). Catalytic properties of FePd ferromagnetic nanowires at liquid/liquid interfaces. *Electrochimica Acta*, 298: 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.12.069>
- Roslyakov, I. V., Kolesnik, I. V., Levin, E. E., Katorova, N. S., Pestrikov, P. P., Kardash, T. Y., y Napolskii, K. S. (2020). Annealing induced structural and phase transitions in anodic aluminum oxide prepared in oxalic acid electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, 381, 125159. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125159>
- Roslyakov, I. V., Shirin, N. A., Berekchiian, M. V., Shatalova, T. B., Garshev, A. V. y Napolskii, K. S. (2020). Coarse-grain alpha-alumina films with highly ordered porous structure. *Microporous and Mesoporous Materials*, 294: 109840. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109840>
- Ruan, Z. y Qiu, M. (2006). Enhanced transmission through periodic arrays of sub-wave length holes: the role of localized waveguide resonances. *Physical Review Letters*, 96(23): 233901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.233901>
- Runge, J. M. (2018). *A brief history of anodizing aluminum. in: the metallurgy of anodizing aluminum. Connecting science to practice.* USA: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72177-4_2
- Santos, A., Alba, M., Rahman, M. M., Formentín, P., Ferré-Borrull, J., Pallarès, J. y Marsal, L. F. (2012). Structural tuning of photoluminescence in nanoporous anodic alumina by hard anodization in oxalic and malonic acids. *Nanoscale Research Letters*, 7(1): 228. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-228>
- Schmidt, T. M., Bochenkov, V. E., Espinoza, J. D. A., Smits, E. C., Muzafarov, A. M.,

- Kononevich, Y. N. y Sutherland, D. S. (2014). Plasmonic fluorescence enhancement of DBMBF2 monomers and DBMBF2-toluene exciplexes using al-hole arrays. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(4): 2138-2145. <https://doi.org/10.1021/jp41110823>
- Schwind, M., Kasemo, B. y Zoric, I. (2013). Localized and propagating plasmons in imetal films with nanoholes. *NanoLetters*, 13(4): 1743-1750. <https://doi.org/10.1021/nl400328x>
- Song, J., Oh, H., Kong, H. y Jang, J. (2011). Polyrhodanine modified anodic aluminum oxide membrane for heavy metal ions removal. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1- 3): 311-317. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.026>
- Sousa, C. T., Leitao, D. C., Proenca, M. P., Ventura, J., Pereira, A. M. y Araujo, J. P. (2014). Nanoporous alumina as templates for multifunctional applications. *Applied Physics Reviews*, 1(3): 031102. <https://doi.org/10.1063/1.4893546>
- Stair, P. C., Marshall, C., Xiong, G., Feng, H., Pellin, M. J., Elam, J. W. y Wang, H. H. (2006). Novel, uniform nanostructured catalytic membranes. *Topics in catalysis*, 39(3-4), 181-186. <https://doi.org/10.1007/s11244-006-0055-0>
- Sulka, G. D. (2008). Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing. *Nanostructured Materials in Electrochemistry*, 1: 1-116. <https://doi.org/10.1002/9783527621507.ch1>
- Sun, B., Li, J., Jin, X., Zhou, C., Hao, Q. y Gao, X. (2013). Self-ordered hard anodization in malonic acid and its application in tailoring alumina taper-nanopores with continuously tunable periods in the range of 290-490 nm. *Electrochimica Acta*, 112: 327- 332. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.08.147>
- Thompson, G. E. y Wood, G. C. (1981). Porous anodic film formation on aluminium. *Nature* 290:230-232. <https://doi.org/10.1038/290230a0>
- Uryu, S. y Ando, T. (1998). Numerical study of localization in antidotlattices. *Physical Review B*, 58(16): 10583. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.10583>
- Vavassori, P., Gubbiotti, G., Zangari, G., Yu, C. T., Yin, H., Jiang, H. y Mankey, G. J. (2002). Lattice symmetry and magnetization reversal in micron-size antidot arrays in Permalloy film. *Journal of Applied Physics*, 91(10): 7992-7994. <https://doi.org/10.1063/1.1453321>
- Wang, C. C., Adeyeye, A. O. y Singh, N. (2006). Magnetic antidot nanostructures: effect of lattice geometry. *Nanotechnology*, 17(6): 1629. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/6/015>
- Wang, J., Huang, L., Zhai, L., Yuan, L., Zhao, L., Zhang, W., Dongzhi, S., Hao, A., Feng, X. y Zhu, J. (2012). Hot spots engineering in hierarchical silver nanocap array for surface-enhanced Raman scattering. *Applied Surface Science*, 261: 605-609. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.08.063>
- Wang, Q., Long, Y. y Sun, B. (2013). Fabrication of highly ordered porous anodic alumina membrane with ultra-large pore intervals in ethylene glycol-modified citric acid solution. *Journal of Porous Materials*, 20(4): 785-788. <https://doi.org/10.1007/s10934-012-9653-3>
- Wefers, K. y Misra, C. (1987). *Oxides and hydroxides of aluminum*, 19: 1-92. Pittsburgh, PA: Alcoa Laboratories.

- Wehrspohn, R. B. (2005). *Ordered porous nanostructures and applications*. EUA: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/b106900>
- Wunderlich, B. (1990). *Thermal analysis*. EUA: Academic Press, INC.
- Xu, W. L., Zheng, M. J., Wu, S. y Shen, W. Z. (2004). Effects of high-temperature annealing on structural and optical properties of highly ordered porous alumina membranes. *Applied Physics Letters*, 85(19): 4364-4366. <https://doi.org/10.1063/1.1815072>
- Xu, Y. F., Liu, H., Li, X. J., Kang, W. M., Cheng, B. W. y Li, X. J. (2015). A novel method for fabricating self-ordered porous anodic alumina with wide interpore distance using phosphoric/oxalic acid mixed electrolyte. *Materials Letters*, 151: 79-81. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.03.049>
- Yang, S. G., Li, T., Huang, L. S., Tang, T., Zhang, J. R., Gu, B. X. y Lu, Y. N. (2003). Stability of anodic aluminum oxide membranes with nanopores. *Physics Letters A*, 318(4-5): 440-444. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2003.09.051>
- Yao, J., Liu, Z., Liu, Y., Wang, Y., Sun, C., Bartal, G., Stacy, G. M. y Zhang, X. (2008). Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires. *Science*, 321(5891): 930-930. <https://doi.org/10.1126/science.1157566>
- Zaraska, L., Stepniowski, W. J., Jaskuła, M. y Sulka, G. D. (2014). Analysis of nanopore arrangement of porous alumina layers formed by anodizing in oxalic acid at relatively high temperatures. *Applied Surface Science*, 305: 650-657. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.154>
- Zaraska, L., Wierzbicka, E., Kurowska-Tabor, E. y Sulka, G. D. (2015). *Nanoporous alumina: fabrication, structure, properties, applications*. Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20334-8>
- Zhang, R., Jiang, K. y Ding, G. (2010). Surface morphology control on porous anodic alumina in phosphoric acid. *Thin Solid Films*, 518(14): 3797-3800. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.01.004>

Temática y alcance

Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología es una revista científica de acceso abierto revisada por pares, dirigida a especialistas en nanociencias y nanotecnología. Tiene como objetivo dar a conocer los principales resultados de investigación en el área, incluyendo sus implicaciones sociales, ambientales, éticas y legales. Por su naturaleza es una publicación de alcance internacional. Publica artículos exclusivamente de investigación y revisiones del campo de conocimiento de interés, escritos tanto en inglés como en español.

Se publica dos veces al año (los meses de enero y julio), en formato impreso y electrónico. Editada y patrocinada desde 2008 de forma ininterrumpida por la Universidad Nacional Autónoma de México.

Política de secciones

Editorial

Escrita por los integrantes del Comité Editorial y, cuando así corresponda, también por los editores invitados. Los textos aquí incluidos destacan las temáticas abordadas en cada fascículo, haciendo énfasis en las principales tendencias de investigación en el área. De igual forma, es un espacio donde se presentan los avances y logros de la revista, así como temas de interés editorial.

Artículos de revisión

Por invitación de los editores o del Comité Editorial. Versan sobre los avances y controversias en el campo de las nanociencias y la nanotecnología, con una amplia revisión bibliográfica, destacando puntos de vista analíticos. Su principal propósito es ofrecer una actualización integral acerca de los temas que trata la revista. Todas las colaboraciones solicitadas para esta sección serán sometidas a dictamen académico bajo la modalidad pares ciegos.

Artículos de investigación

Artículos de alto nivel producto de investigaciones originales e inéditas dentro del campo de las nanociencias y la nanotecnología, tomando en consideración sus implicaciones sociales, ambientales, éticas y legales. Hallazgos o resultados originales de proyectos de investigación que evidencien una postura teórica, metodología clara, resultados, discusión y conclusiones. Todas las colaboraciones dirigidas a esta sección serán sometidas a dictamen académico bajo la modalidad pares ciegos.

Dictamen editorial

Los autores que postulen un artículo para su posible publicación en *Mundo Nano* deberán remitir—completa y en su versión final— la documentación indicada en la sección [requisitos para la postulación de originales](#). Una vez que el equipo editorial acredite el cumplimiento de todos los requisitos de postulación, el texto será remitido a dictamen editorial el cual contempla las siguientes etapas:

1. Acreditar una revisión bajo la herramienta aprobada por el Comité Editorial para detección de plagio. Solo posterior a ello será posible continuar con las siguientes etapas del dictamen editorial.
2. Se verificará que el texto postulado guarde relación con el enfoque y alcance de la revista. No se considerarán

aquellos trabajos que no contemplen explícitamente como componente relevante la dimensión nano.

3. Se revisará que el texto cumpla con todas y cada una de las indicaciones de forma señaladas en los [requisitos para la postulación de originales](#) y [requisitos para la entrega de originales](#) así como en las [instrucciones para los autores](#).
4. Se revisará que la bibliografía a la que se recurre sea pertinente y actualizada, y que esté debidamente estandarizada según la norma Chicago ver: http://www.chicagomanualofstyle.org/tools_citationguide.html
5. De acuerdo con los lineamientos de política editorial aprobados por el Comité Editorial, se dará prioridad a los textos cuya bibliografía se entregue gestionada electrónicamente y con hipervínculos activos a los DOI respectivos, en todos los casos que así corresponda.

Una vez que el artículo postulado acredite el dictamen editorial, se notificará formalmente al autor de contacto el registro e inicio del proceso de dictamen académico.

Dictamen académico

Los artículos deberán acreditar favorablemente el proceso de dictamen académico el cual operará bajo la modalidad de doble revisión por pares ciegos, donde la identidad tanto de los autores como de los dictaminadores permanecerán en anonimato, para ello se tomarán en consideración los siguientes lineamientos:

1. Los artículos que acrediten el dictamen editorial serán enviados a académicos expertos en la misma área disciplinaria y temática que las del texto postulado. Los revisores serán seleccionados de entre la cartera de árbitros—integrada por especialistas de instituciones nacionales e internacionales— quienes emitirán comentarios acerca de la pertinencia y calidad académica del texto propuesto y determinarán la factibilidad de la publicación del texto en cuestión.
2. Los dictaminadores tendrán bajo su responsabilidad revisar y analizar la pertinencia académica, teórica y metodológica de todos y cada uno los artículos que les sean asignados. Serán ellos los responsables de revisar la presencia explícita del apartado teórico-metodológico, así como su congruencia respecto del campo de estudios, la coherencia entre el aporte académico y la relevancia de los hallazgos descritos, así como la actualidad y oportunidad de la bibliografía a la que se recurre.
3. Todos los textos serán remitidos a dos expertos—adscritos a una institución distinta de la adscripción de los autores— quienes emitirán sus comentarios. En caso de discrepancia en los dictámenes, se recurrirá a un tercer evaluador para que dirima el desacuerdo.
4. Finalmente, con base en las recomendaciones de los revisores, la decisión de los editores de *Mundo Nano* será:
 - a. Recomendar su publicación sin modificaciones.
 - b. Recomendar su publicación con cambios menores, y que no hacen necesaria una segunda revisión por parte de los árbitros.
 - c. Condicionar su publicación a la realización de cambios importantes, lo que obliga a una nueva revisión por parte de los revisores. Este proceso se puede repetir hasta un máximo de tres rondas, si a este

punto el documento aún no es recomendado para su publicación, el artículo será rechazado sin opción a un nuevo envío.

d. No recomendar su publicación.

5. Para que un texto sea aprobado para su publicación es indispensable que al menos dos de los tres dictámenes sean positivos.
6. La dirección editorial garantizará, en todos los casos, que los dictámenes entregados a los autores contengan argumentos sólidos que respalden la decisión editorial.
7. Los resultados del proceso de dictamen académico serán inapelables en todas las circunstancias.
8. En caso de recibir observaciones, el autor tendrá un plazo de veintidós días naturales para hacer llegar al editor la nueva versión del trabajo. De hacerlo fuera de este plazo, el documento iniciará un nuevo proceso de dictamen.
9. El tiempo para que el documento sea turnado a dictamen estará en función del número de artículos en la lista de espera. Los árbitros, una vez recibido el artículo, tendrán cuatro semanas para realizar la revisión y entregar el resultado.
10. Los documentos aceptados iniciarán el proceso de edición (corrección de estilo, marcaje de metadatos, formación, maquetación, etc.), para, posteriormente, ser incluidos en el fascículo que corresponda, según la decisión de los editores responsables.
11. Una vez concluido el proceso editorial (corrección de estilo, marcaje de metadatos, formación y maquetación), la versión preliminar del texto será turnada a los autores para su última revisión y aprobación. Los autores tendrán un plazo de tres días naturales para la entrega del visto bueno, si no se entregaran comentarios en dicho plazo, la coordinación editorial de la revista asumirá que los autores han dado su aprobación tácita.

Política de acceso abierto

Los autores que publiquen en *Mundo Nano* aceptan las siguientes condiciones:

1. De acuerdo con la legislación de derechos de autor, *Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología* reconoce y respeta el derecho moral de los autores, así como la titularidad del derecho patrimonial, el cual será transferido —de forma no exclusiva— a la revista para su difusión en acceso abierto.
2. *Mundo Nano* no realiza cargos a los autores por enviar y procesar artículos para su publicación.
3. Todos los textos publicados por *Mundo Nano* —sin excepción— se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.
4. Los autores pueden realizar otros acuerdos contractuales independientes y adicionales para la distribución no exclusiva de la versión del artículo publicado en *Mundo Nano*, por ejemplo, incluirlo en un repositorio institucional o darlo a conocer en otros medios en papel o electrónicos, siempre que indique clara y explícitamente que el trabajo se publicó por primera vez en *Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*.

5. Para todo lo anterior, los autores deben remitir el formato de carta-cesión de la propiedad de los derechos de la primera publicación debidamente requisitado y firmado. Este formato debe ser remitido en archivo PDF al correo: mundonano@unam.mx



Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional*.

Código de ética

Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología se suscribe al código de ética para la actuación y desempeño de los actores involucrados en el proceso de publicación de esta revista (editores, comité editorial, autores y revisores) establecidos por el Comité de Ética para Publicaciones (COPE, por sus siglas en inglés) y disponible en <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Detección de plagio

En *Mundo Nano, Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología* se utiliza un *software* especializado para la detección de plagio. Los textos recibidos serán sometidos a revisión antes de enviarlos a dictamen editorial y académico, se rechazarán si el porcentaje de similitud con otro texto publicado o disponible en internet sea superior a 50%.

Si se detecta o sospecha el uso de información redundante o duplicada en un texto postulado, el procedimiento a seguir es el que COPE resume en el siguiente diagrama: <https://publicationethics.org/files/Spanish%20%281%29.pdf>

Preservación de archivos

Esta revista utiliza el sistema LOCKSS para crear un sistema de almacenamiento distribuido entre las bibliotecas participantes y permite la creación de archivos permanentes en la revista con fines de conservación y restauración ver más: <https://www.lockss.org/>

Lineamientos y buenas prácticas editoriales

Estos lineamientos hacen referencia a las políticas de buenas prácticas editoriales del COPE y disponible en: <http://publicationethics.org/resources/guidelines>

Funciones y responsabilidades del Comité Científico

- Promover entre la comunidad académica nacional e internacional la postulación de trabajos para su publicación en la revista.
- Sugerir lineamientos académicos para actualizar la política editorial de la revista.
- Promover la difusión de la revista en medios académicos nacionales e internacionales.
- Participar como dictaminadores de trabajos recibidos para su publicación o recomendar a otros expertos como dictaminadores.

Funciones del Comité Editorial

- Promover entre la comunidad académica nacional e internacional la postulación de trabajos para su publicación en la revista.

- Apoyar en la selección de los dictaminadores para los trabajos recibidos, así como deliberar sobre las mejores opciones de dictaminadores en casos necesarios.
- Decidir sobre la pertinencia de publicación de los materiales recibidos, apoyándose en los dictámenes de expertos.
- Aprobar el contenido propuesto para cada número de la revista.
- Revisar y evaluar cada número publicado.
- Colaborar con las instancias correspondientes para mantener la periodicidad establecida para la publicación.

Funciones y responsabilidades del editor en jefe y editores

- Coordinar las acciones conducentes al cumplimiento de los objetivos de la revista.
- Procurar un alto nivel académico en el contenido que se publica.
- Recibir los trabajos propuestos para su publicación y solicitar los dictámenes académicos.
- Vigilar el cumplimiento de las recomendaciones de los dictaminadores.
- Informar a los autores la fase del proceso editorial en la que se encuentre el texto enviado.
- Informar al Comité Editorial sobre el proceso de arbitraje de todos los materiales recibidos, cuidando la confidencialidad
- Proponer al Comité Editorial el contenido de cada número de la revista, a partir de los textos que estén corregidos y aprobados al momento.

Funciones y responsabilidad del editor asociado

- Coordinar el proceso de dictamen editorial.
- Planificar y coordinar el proceso de producción editorial de la revista.
- Supervisar el procesamiento técnico de los materiales aprobados por el Comité Editorial, una vez que han cubierto los requisitos académicos establecidos.
- Supervisar la corrección de estilo y la calidad técnica de la revista.
- Colaborar para mantener la periodicidad establecida para la publicación de la revista y para que la difusión y distribución de cada número inicie durante el primer mes del periodo correspondiente.

Responsabilidades de los autores

- Atender los requisitos de publicación de la revista relativos a: originalidad, que el texto sea inédito, pertinencia.
- Presentar sus resultados con honestidad y sin mentira, falsificación o manipulación de datos.
- Asumir la responsabilidad colectiva, si es el caso, para el trabajo presentado y publicado.
- Las fuentes de financiamiento y los conflictos de intereses pertinentes deben señalarse en el artículo.
- Citar el trabajo de los demás con precisión y sólo referir publicaciones utilizadas en el texto.
- Los autores deben informar a los editores si los resultados han sido publicados con anterioridad o si varios informes o análisis múltiples de un mismo conjunto de datos están bajo consideración para su publicación en otro lugar. Los autores deben proporcionar copias de las publicaciones o trabajos afines presentados a otras revistas.

Responsabilidades de los dictaminadores

- Aceptarán la revisión de textos que se ajusten a su área de especialidad, con el fin de realizar una evaluación adecuada.
- Declararán desde el inicio del proceso si existe conflicto de interés. Si se tiene sospecha de la identidad del autor(es), notificar a la revista si este conocimiento plantea cualquier posible conflicto de intereses.
- Rechazarán la revisión de inmediato si no le es posible entregarla en el plazo acordado.
- Emitirán su evaluación basándose en la originalidad, la contribución del artículo a la temática, la metodología empleada, la pertinencia y actualidad de la bibliografía utilizada; el estilo, la coherencia y la calidad en la estructura y en la redacción del texto.
- Informarán a la revista, de inmediato, si durante la evaluación encuentran o descubren que no tienen la experiencia necesaria para evaluar todos los aspectos del texto.
- Sus críticas serán objetivas, específicas y constructivas.
- Definirán con claridad la aprobación, rechazo o condicionamiento del texto.
- Emitirán su evaluación en el plazo acordado.
- Respetarán la confidencialidad durante y después del proceso de evaluación.
- No utilizarán contenido del texto revisado o en revisión.
- No involucrarán a otras personas en la revisión que les fue solicitada.
- Comunicarán a la revista si detectan similitud del texto con otro que hayan revisado o si identifican cualquier tipo de plagio.
- No se permite transferir la responsabilidad de realizar un dictamen a ninguna otra persona, asistente o colaborador.

Registro en directorios y bases de datos de contenido científico

 DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS	Directory of Open Access Journals
	Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex-Catálogo)
	Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB)
	Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (PERIÓDICA)
	Bibliografía Latinoamericana (Biblat)
	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
	Scientific Electronic Library Online

Envíos online

¿Ya cuenta con nombre de usuario/contraseña para *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*?

VAYA A IDENTIFICACIÓN

¿Necesita un nombre de usuario/a/contraseña?

VAYA A REGISTRO

Es necesario registrarse e identificarse para poder enviar artículos *online* y para comprobar el estado de los envíos.

Requisitos para la postulación de originales

Los artículos que sean postulados para su posible publicación en *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología* deberán remitir la siguiente documentación completa y en su versión final a través de la interfase Open Journal Systems. No se aceptarán postulaciones que no sean enviadas por este medio:

1. **Carta de originalidad y no postulación simultánea**, esta carta también debe ser llenada con los datos del autor o autores, y, en el caso de artículos con dos o más autores, se deben proveer los datos de todos y cada uno de ellos. Se deberá identificar al autor que firma como responsable del texto, así como al autor de correspondencia.
2. **Formato de cesión de derechos patrimoniales**, debe ser llenado y firmado con los datos del autor o autores. En el caso de artículos con dos o más autores, se deben proveer los datos de todos y cada uno de ellos, y se deberá identificar al autor que firma como responsable del texto, así como al autor de correspondencia.
3. Anexar el contenido completo del artículo que se postula y los archivos adicionales, en su versión final. No se aceptarán cambios una vez iniciado el proceso.

Requisitos para la entrega de originales

Para la entrega del material se deberán tomar en consideración los siguientes criterios:

1. **Página de presentación**: se deberá anotar el título del artículo, el cual deberá ser corto y atractivo; el nombre del autor —o autores— y una breve semblanza curricular de no más de tres líneas. Se deberán indicar las instituciones de adscripción de cada autor, con las direcciones postales y electrónicas, así como los números telefónicos. En esta página también se deberá precisar al autor que firma como responsable del texto, así como al autor de correspondencia.
2. Entregar el contenido textual en archivos en formato electrónico para procesador de textos, sin clave de contraseña (el envío de archivos en PDF no es pertinente para el proceso editorial).
3. Entregar fotografías e imágenes en archivos electrónicos en formato jpg (o compatible) con al menos 300 dpi de resolución. Es indispensable anexar las gráficas, tablas o cuadros en hoja de cálculo por separado. Las imágenes de gráficas, cuadros o tablas no son pertinentes para el proceso editorial.
4. Contar con los derechos de reproducción del material gráfico, imágenes, fotografías, obra artística, etcétera, ya sea por parte del propio autor (autores), o bien de terceros.
5. Una vez cumplidos los requisitos de postulación el texto será remitido a **Dictamen Editorial**.

Instrucciones para autores

1. **Naturaleza de los trabajos**: las contribuciones que se reciban para su eventual publicación deben ser resultados originales derivados de un trabajo académico de alto nivel. Solo se aceptarán documentos vinculados con la nanociencia y la nanotecnología, incluyendo abordajes que destaquen sus implicaciones sociales, ambientales, éticas y legales, con la condición de presentar de manera explícita y detallada las estrategias teórico-metodológicas a las que se recurre y enfatizar los hallazgos producto de su aplicación.
2. **Extensión y formato**: los artículos de investigación podrán tener una extensión de entre 8,000 y 10,000 palabras, y las revisiones de entre 5,000 y 8,000 palabras. Deberán estar escritos en procesador de textos, en tamaño carta con márgenes de 2.54 centímetros, Times New Roman de 12 puntos, interlineado doble, sin espacio entre párrafos. Las páginas deberán estar foliadas desde la primera hasta la última en el margen inferior derecho. La extensión total incluye abordaje textual, bibliografía, tablas, gráficas, figuras, imágenes y todo material adicional.
3. **Exclusividad**: los trabajos enviados a *Mundo Nano* deberán ser inéditos y sus autores se comprometen a no someterlos simultáneamente a la consideración de otras publicaciones, por lo que es necesario adjuntar este documento: **Carta de originalidad y no postulación simultánea**.
4. **Coautorías**: de acuerdo con la política editorial y respecto de la autoría colectiva, se aceptarán como máximo cuatro autores, si se postularan artículos con más autores se deberá justificar la razón y naturaleza de la coautoría, quedando a juicio del Comité Editorial la aceptación o rechazo editorial del documento. En todos los casos se deberá indicar el tipo de participación de cada uno de los autores. Por ningún motivo se aceptará cambio en el orden en que fueron presentados los autores al momento de la postulación, y no será posible omitir ni agregar ningún autor que no hubiese sido señalado desde el inicio, por lo que será necesario identificar dicha información en los datos de registro.
5. **Frecuencia de publicación**: cuando un autor ha publicado en *Mundo Nano*, deberá esperar un año para publicar nuevamente.
6. **Idiomas de publicación**: se recibirán textos escritos tanto en español como en inglés.
7. **ID Autores**: es indispensable que todos y cada uno de los autores proporcionen su número de identificador normalizado ORCID. Para mayor información ingresar a www.orcid.org
8. **Institución de adscripción**: es indispensable señalar la institución de adscripción y país de todos y cada uno de los autores, evitando el uso de siglas o acrónimos. Se debe evitar la traducción de los nombres de instituciones.
9. **Anonimato en la identidad de los autores**: los artículos no deberán incluir en el cuerpo del artículo, ni en las notas a pie de página información que revele su identidad, ello con el fin de asegurar una evaluación anónima por parte de los pares académicos que realizarán el dictamen. Si es preciso, dicha información podrá agregarse una vez que se acredite el proceso de revisión por pares.
10. **Estructura de los artículos**: los artículos incluirán una introducción que refleje con claridad los antecedentes

del trabajo, el método o estrategia de análisis a la que se recurre, discusión, resultados, conclusiones y bibliografía. Si así lo consideran los autores se podrán presentar secciones y apartados propiamente jerarquizados y diferenciados solo con el uso de tipografía (sin usar números arábigos o romanos).

11. **Título:** el título del artículo de máximo 15 palabras deberá estar en español e inglés y deberá expresar de manera clara, concisa y descriptiva el contenido.
12. **Resumen y abstract:** deberá integrarse un resumen en español e inglés, de máximo 150 palabras, donde se describa el tema, propósito y resultados principales del trabajo. Se recomienda que el resumen responda a los siguientes temas: pregunta a la que responde el texto, marco o perspectiva teórica asumida, metodología empleada y principales hallazgos.
13. **Palabras clave y keywords:** se deberá incluir una lista de 3 a 5 palabras clave en español e inglés.
14. **Uso de siglas y acrónimos:** para el uso de acrónimos y siglas en el texto, la primera vez que se mencionen, se recomienda escribir el nombre completo al que corresponde y enseguida colocar la sigla entre paréntesis. Ejemplo: Petróleos Mexicanos (Pemex), después solo Pemex.
15. **Anexos y apéndices:** los artículos no incluirán anexos o apéndices, para ese caso se sugiere al autor el depósito de los mismos en repositorios de datos y, en su caso, indicar el DOI correspondiente para consulta.
16. **Notas:** las notas deberán indicarse a pie de página, estar numeradas y ser las estrictamente necesarias. Las notas a pie de página se reservarán para ampliaciones al texto o aclaraciones del/la autor/a, no podrán utilizarse para indicar bibliografía con locuciones latinas.
17. **Tablas y figuras:** se incluirán al final del artículo con la anotación precisa para su inclusión en el lugar donde son mencionados en el texto. Por ejemplo: Aquí tabla 1. La numeración de las tablas será consecutiva, en orden ascendente y con números arábigos. De igual manera el título se ubicará en la parte superior y la fuente completa a pie de tabla. Los autores tendrán la obligación de revisar que la fuente de todas las tablas y figuras esté indicada en la bibliografía final.
18. **Elementos gráficos:** todos los elementos gráficos, esquemas, mapas, etc., se nombrarán Figuras y tendrán una numeración consecutiva en números arábigos. El título se ubicará en la parte superior y la fuente completa a pie de cada figura. El autor tendrá la obligación de revisar que las fuentes de todas las figuras estén indicadas en la bibliografía final. Además de incluirlos en el artículo, todo elemento gráfico se entregará en archivo independiente en formato jpg (o compatible), con una resolución mínima de 300 dpi. Si las gráficas son elaboradas en Microsoft Excel, se deberá anexar el archivo fuente.
19. **Información adicional:** los artículos no incluirán epígrafes ni dedicatorias.
20. **Las referencias y citas bibliográficas:** al final del artículo deberán indicarse todas y cada una de las fuentes citadas en el cuerpo del texto (incluyendo notas, fuentes de las tablas y figuras). El autor debe revisar cuidadosamente que no haya omisiones ni inconsistencias entre las obras citadas y la bibliografía. Se incluirán en la lista de referencias solo las obras citadas en el cuerpo y notas del artículo. La bibliografía deberá presentarse estandarizada recurriendo a la norma Chicago, tomando como guía los siguientes ejemplos:

Artículos en revistas (no se abrevien los títulos ni de los artículos ni de las revistas):

- Takeuchi, N. 1998. Cálculos de primeros principios: un método alternativo para el estudio de materiales. *Ciencia y Desarrollo*, 26(142): 18.
- Libros:
- Delgado, G. C. 2008. *Guerra por lo invisible: negocio, implicaciones y riesgos de la nanotecnología*. México: CEIICH, UNAM.
- Internet:
- NobelPrice.org. 2007. The Nobel Prize in Physics 1986. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/press.html

Estos lineamientos fueron aprobados por el Comité Científico y el Comité Editorial de *Mundo Nano*. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, el día 12 de febrero de 2018, y se reflejará en los contenidos que se publiquen a partir de 2019).

Lista de comprobación de preparación de envíos

Como parte del proceso de envío, se les requiere a los autores que indiquen que su envío cumpla con todos los siguientes elementos, y que acepten que envíos que no cumplan con estas indicaciones pueden ser devueltos al autor.

1. El envío no ha sido publicado previamente ni se ha enviado previamente a otra revista (o se ha proporcionado una explicación en Comentarios al / a la editor/a).
2. El archivo enviado está en procesador de palabras, sin contraseña de lectura.
3. Se han añadido direcciones web para las referencias donde ha sido posible.
4. El texto tiene interlineado simple; el tamaño de fuente es 12 puntos; se usa cursiva en vez de subrayado (exceptuando las direcciones URL); y todas las ilustraciones, figuras y tablas están dentro del texto en el sitio correspondiente y no al final.
5. El texto cumple con los requisitos bibliográficos y de estilo indicados en las instrucciones para autores, que se pueden encontrar en "Acerca de la revista".
6. Si está enviando a una sección de la revista que se revisa por pares, tiene que asegurarse de que las instrucciones en garantizar una evaluación por pares anónima han sido seguidas.

Declaración de privacidad

Los nombres y direcciones de correo-e introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines declarados por esta revista y no estarán disponibles para ningún otro propósito u otra persona.

Garantizar una evaluación por pares anónima

Para asegurar la integridad de la evaluación por pares anónima para el envío a la revista, se debe intentar que los autores y los revisores desconozcan sus identidades entre ellos. Esto implica que los autores, editores y revisores (los cuales suben documentos como parte de su revisión) comprueben si los siguientes pasos se han seguido cuidadosamente en cuanto al texto y las propiedades del archivo:

1. Los autores del documento han eliminado sus nombres del texto, con "Autor/a" y el año que se usa en las referencias y en las notas a pie de página, en vez del nombre de los autores/as, el título del artículo, etcétera.
2. En los documentos de Microsoft Office, la identificación del autor también debe eliminarse de las propiedades del archivo.

Para **Microsoft 2003** y versiones previas, y versiones de Word de **Macintosh**:

- Seleccione en el menú Archivo: Guardar como > Herramientas (u Opciones en Mac) > Seguridad > Eliminar información personal en las propiedades del archivo al guardar > Guardar.

Para **Macintosh Word 2008** (y futuras versiones):

- En el menú "Archivo" seleccione "Propiedades".
- En la pestaña "Resumen" elimine la información identificativa de todos los campos.
- Guarde el archivo.

Para **Microsoft 2007** (Windows):

- Haga clic en el botón de Office en la esquina superior izquierda de la aplicación Office
- Seleccione "Preparar" en el menú "Opciones".
- Seleccione "Propiedades" para el menú "Opciones" de "Preparar".

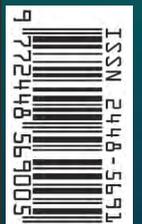
- Elimine toda la información de los campos de propiedades del documento que aparecen debajo del menú principal de opciones.
- Guarde el documento y cierre la sección de campos de propiedades del documento.

Para **Microsoft 2010** (Windows):

- En el menú "Archivo" seleccione "Preparar para compartir".
- Haga clic en el icono "Comprobación de problemas".
- Haga clic en el icono "Inspeccionar documento".
- Desmarque todas las casillas excepto "Propiedades del documento e información personal".
- Ejecute el inspector de documento, el cual realizará una búsqueda en las propiedades del documento e indicará si algún campo de propiedades del documento contiene alguna información.
- Si el inspector de documento encuentra información se lo notificará y le dará la opción "Eliminar todo", en la cual tendrá que hacer clic para eliminar todas las propiedades del documento y la información personal.

Para archivos **PDF**:

- En los PDFs, los nombres de los autores/as también deben ser eliminados de las propiedades del documento que se encuentran debajo de Archivo en el menú principal de Adobe Acrobat.



ISSN 2448-5691
9 772448 569005