

# **NANOSEGURIDAD: CONFRONTANDO LOS RIESGOS DE LA NANOTECNOLOGÍA**

“Debemos conseguir que la nanotecnología se convierta en la próxima revolución industrial, pero que, a diferencia de revoluciones tecnológicas anteriores, lo consiga con el mayor respeto a la seguridad, la salud y el medio ambiente.”

**POR FRANCISCO BALAS  
Y JESÚS SANTAMARÍA**

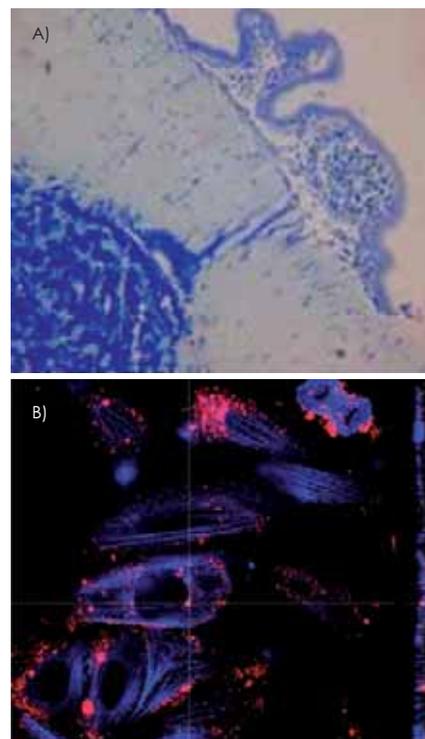
## Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

La Nanociencia está sentando las bases científicas para una revolución tecnológica, con aplicaciones en áreas tan diversas como la información y la comunicación, los materiales, la energía o la medicina. Proporciona además conceptos que ya han dejado atrás el laboratorio y entrado en el terreno comercial, alcanzando casi todos los sectores industriales, con el consiguiente impacto económico. Las perspectivas de crecimiento para el mercado nanotecnológico son espectaculares, incluso en esta época de crisis. Lux Research<sup>1</sup> ha estimado las ventas de productos con componentes nanotecnológicos en 245.000 millones de dólares en 2009, y prevé que esta cifra se multiplique por 10 en 2015. Estos productos hacen tiempo que han alcanzado a los consumidores, formando parte de objetos de uso cotidiano.

Hace ahora cinco años, en marzo de 2006 se compiló en Estados Unidos el primer registro de productos comerciales que empleaban algún tipo de nanotecnología.<sup>2</sup> El número de productos fue entonces de 212 y contenía algunos dispositivos electrónicos, materiales de alta tecnología y cosméticos. Ese mismo listado ha llegado actualmente a 1317 productos pero no incluye, ni mucho menos, todos los disponibles que se estiman entre 2500 y 3000. Hoy en día son los artículos relacionados con la salud y el bienestar personal los que dominan en los inventarios de productos derivados de las nanotecnologías, representando más de la mitad de los artículos registrados. El grupo principal de los materiales se refiere a compuestos con nanopartículas de plata (24% del inventario del PEN<sup>3</sup>), empleado por sus capacidades antimicrobianas, frente al resto de los materiales que van desde los nanotubos de carbono, *quantum dots* de diversa composición y otros óxidos metálicos tales como el dióxido de titanio y el óxido de cinc. La mayor parte de estos productos se manufacturan en los Estados Unidos y China, seguidos muy de lejos por Canadá, Alemania e India. En España existe una actividad de investigación científica muy considerable que, afortunadamente, no desdeña las aplicaciones: en número de patentes relacionadas con la nanotecnología nos situamos por delante de países como Italia o Rusia.<sup>3</sup>

**“Las perspectivas de crecimiento para el mercado nanotecnológico son espectaculares, incluso en esta época de crisis.”**

**Productos de consumo que incluyen nanomateriales en su composición.**



**Penetración de nanomateriales en sistemas biológicos.**

**A) Corte histológico de nanopartículas de C60 en células de pulmón (<http://www.plymouth.ac.uk/pages/view.asp?page=32415>).**

**B) Imagen de microscopía confocal mostrando nanopartículas de sílice en el interior de células. Colaboración con el grupo de Nuria Villaboa, Hospital La Paz (Madrid).**

Junto con el desbordante interés académico e industrial que la Nanotecnología despierta, han comenzado a elevarse voces que cuestionan la seguridad de los nanomateriales para la salud humana. Nanopartículas y nanohilos de variada naturaleza han demostrado repetidamente su capacidad de atravesar membranas biológicas, alcanzando no solo el citoplasma sino el núcleo de distintos tipos de células. Esta característica, al mismo tiempo que posibilita prometedoras aplicaciones biomédicas, plantea también interrogantes en cuanto a la posibilidad de que se produzca la absorción indeseada de nanomateriales en el organismo, con efectos biológicos adversos que han podido demostrarse claramente en estudios con cultivos celulares y con animales de laboratorio. Existe una preocupación creciente no solo por los riesgos reales del manejo de nanomateriales, que siempre pueden minimizarse con las medidas adecuadas, sino porque la percepción de estos riesgos por parte del público puede cambiar la imagen favorable que los sondeos de opinión reflejan en relación con la Nanotecnología.<sup>4</sup>

A la hora de enfocar este tema, vale la pena comenzar por reconocer que los nanomateriales siempre han estado con nosotros. Se han encontrado nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en los pulmones de un cuerpo humano de más de 7.000 años de antigüedad encontrado en el Tírol, y nanotubos de carbono atrapados en hielo de 10.000 años de antigüedad.<sup>5</sup> Estamos, además,

1. Lux Research, Global Trends in Nanotech and Cleantech, 2010 ([www.luxresearchinc.com](http://www.luxresearchinc.com)).
2. Proyecto en Nanotecnologías Emergentes (PEN). The Woodrow Wilson International Center for Scholars <http://www.nanotechproject.org>.
3. Maclurcan, D. C. (2008) "Nanotechnology and Developing Countries Part 2: What Realities?" <http://www.azonano.com/Details.asp?ArticleID=1429>.
4. Satterfield, T. y cols. Nature Nanotechnology 2009, 4, 752.
5. Murr, L.E., Mater. Characteriz. 2009, 60, 261.

## Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

en contacto cotidiano con nanopartículas: en cada respiración inhalamos unos 10 millones, fundamentalmente sílice y óxido de titanio, así como nanomateriales carbonosos originados por procesos de combustión, debidos en buena parte al tráfico rodado pero también al humo de nuestras cocinas. La inmensa mayoría son, por tanto, nanomateriales clásicos, a los que hemos estado expuestos desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, la actividad investigadora en Nanociencia en las últimas dos décadas ha creado una miríada de nuevos materiales sintetizados artificialmente en el laboratorio (conocidos como ENs por sus siglas en inglés: *Engineered Nanomaterials*) cuyo número y variedad aumenta constantemente. Son los ENs los que concentran la mayor parte de la preocupación ya que, debido a su novedad, sus propiedades y sus posibles efectos adversos son en gran parte desconocidos. En el año 2004, la plataforma de Internet europea sobre Nanotecnología Nanoforum.org realizó una encuesta online en colaboración con la Comisión Europea para determinar la actitud del público hacia determinados aspectos del desarrollo de

la Nanociencia y Nanotecnología. La mayor parte de los que respondieron (75%) consideró que los riesgos para la salud, la seguridad de los trabajadores y el medio ambiente debían ser incorporados cuanto antes a la investigación. También se reclamó que las instituciones europeas consideren seriamente las implicaciones sociales de la Nanotecnología fomentando una mayor comunicación y dialogo entre instituciones, tecnólogos y consumidores.<sup>6</sup>

¿Por qué no existe una información más clara sobre los potenciales efectos nocivos de los materiales que se van sintetizando? La principal razón es que la evaluación de la toxicidad de los nanomateriales es compleja porque depende no solo de la composición química del material sino de factores tales como su tamaño, área superficial, forma, agregación, recubrimiento superficial y solubilidad.<sup>7</sup> Por otro lado, un mismo nanomaterial puede tener efectos adversos hacia unos tipos de células pero no hacia otros, e incluso diferentes indicadores de toxicidad pueden estar en desacuerdo.<sup>8</sup> Esta complejidad ha originado la aparición de una

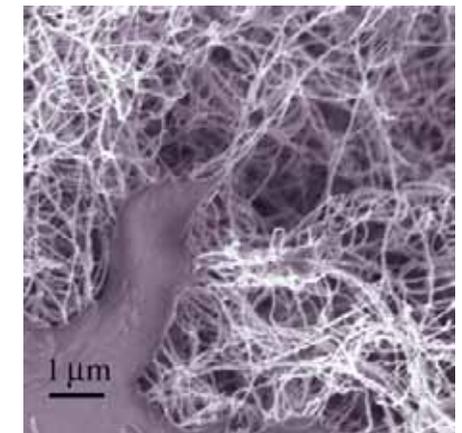
nueva disciplina, la *nanotoxicología*, que busca determinar el efecto sobre los diferentes organismos de la exposición a nanopartículas de diversa naturaleza.

**“Vale la pena comenzar por reconocer que los nanomateriales siempre han estado con nosotros.”**

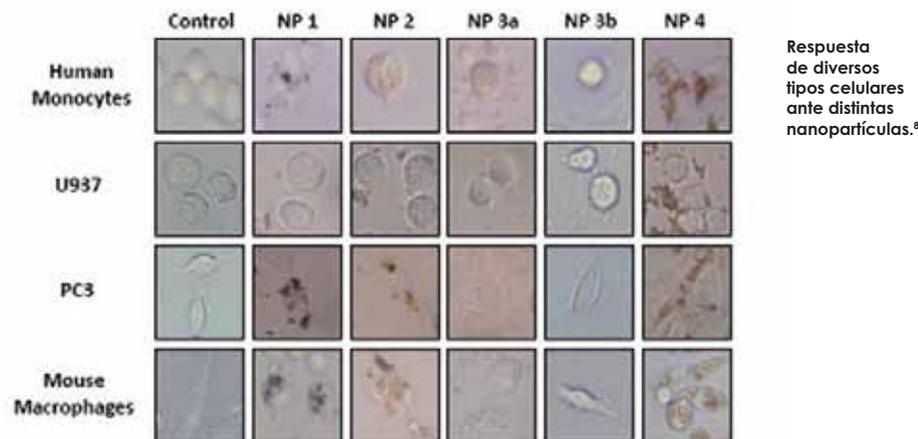
En este punto se plantea un dilema claro: por un lado se reconoce la posibilidad de que algunos nanomateriales puedan tener afectos adversos para la salud humana y se admite que, debido a la complejidad de los fenómenos involucrados, se requerirá mucho tiempo y esfuerzo hasta que estos posibles efectos puedan establecerse con precisión. Por otro, es evidente que el desarrollo de la Nanotecnología no puede detenerse, a la vista de los potenciales beneficios sociales y económicos que representa. Por ello, mientras se sigue avanzando en la investigación toxicológica se investiga en otras aproximaciones, más cercanas a la ingeniería que a la toxicología, que desarrollan métodos para gestionar los riesgos, analizan el comportamiento de aerosoles formados por nanomateriales, estudian su generación, monitorizan su presencia en el medio ambiente y desarrollan procedimientos adecuados para su retirada y desecho. Se parte de la base de que no deben aceptarse sin más las normas actuales de seguridad que se aplican a compuestos químicos,

porque el comportamiento presenta suficientes diferencias como para que los métodos habituales sean inadecuados en determinados escenarios.

Las vías de entrada de los ENs al organismo son similares a las que se consideran tradicionalmente para la exposición a productos químicos. La principal exposición a los nanomateriales resulta de la inhalación del aire en ambientes conteniendo ENs. Ciertamente, los estudios en este campo no solo han encontrado nanomateriales en los pulmones



Micrografía de nanotubos de carbono sobre células de pulmón de ratón ([http://www.cdc.gov/niosh/blog/nsb052008\\_nano.html](http://www.cdc.gov/niosh/blog/nsb052008_nano.html)).



- Malsch, I., Oud, M. (2004) "Outcome of the open consultation on the European strategy for nanotechnology. Report, Nanoforum publication" <http://www.nanoforum.org/dateien/temp/nanosurvey6.pdf?24072005161134>.
- Nel, A. y cols. Science, 2006, 311, 622.
- Diaz, B. y cols. Small 2008, 4, 2025.
- Donaldson, K. y Poland, C.A., Nature Nanotechnology 2009, 4, 708.

## Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

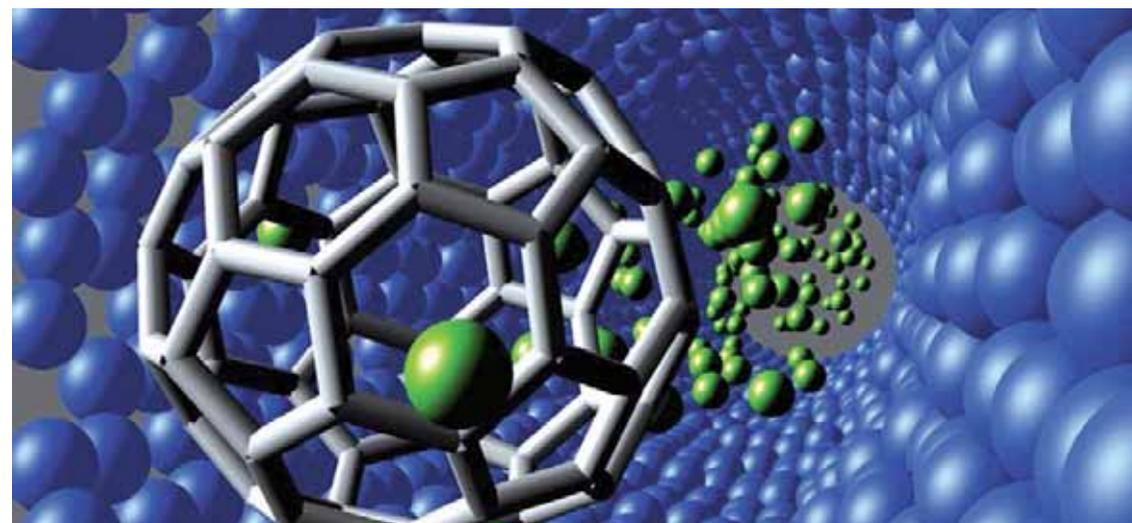
de animales de laboratorio expuestos, sino que han mostrado vías por las que algunos de estos materiales pueden conducir a la formación de tumores.<sup>9</sup> La ingestión es menos frecuente, pero puede darse involuntariamente, especialmente si hay alimentos en el lugar de manipulación o si se come con ropa de trabajo, y representa una vía de contaminación a veces más peligrosa que la inhalación. La piel es una barrera débil frente a materia nanoparticulada que, en múltiples ocasiones, puede penetrar a través de los poros. Otras vías de penetración (mucosas, heridas) son menos habituales.

En la actualidad, la concentración de ENs en el ambiente general es baja, por lo que los lugares más expuestos a los riesgos asociados a las nanopartículas son las industrias que fabrican o procesan productos con nanomateriales y los laboratorios de investigación. En este sentido, cabría esperar que los manipuladores de nanomateriales fuesen conscientes de los riesgos potenciales y actuaran en consecuencia, pero la realidad dista mucho de esa situación ideal. En un estudio llevado a cabo entre marzo y junio de 2009 en más de 200 centros de investigación en Nanociencia en todo el mundo, se llegó a la conclusión de que la mayor parte de los investigadores en Nanotecnología no emplean el equipamiento de protección individual o general adecuado cuando trabajan con nanopartículas que pueden dispersarse en

el aire.<sup>10</sup> El mismo estudio muestra que el desecho de residuos conteniendo nanomateriales, en esos mismos laboratorios, con frecuencia se lleva a cabo de forma inapropiada, y que las prácticas de seguridad e higiene son deficitarias en algunos aspectos fundamentales. Existen varias razones para estas carencias, tales como la familiaridad de los investigadores con los nanomateriales, que puede llevar a una subestimación de los riesgos, así como el hecho de que los estudios de toxicidad se centran en la respuesta biológica ante una exposición corta de alta intensidad en lugar de considerar la exposición crónica a bajas concentraciones. Pero quizás el factor más importante sea la falta de límites de exposición válidos para nanopartículas, similares a los habitualmente utilizados para compuestos químicos convencionales (como los valores límite umbral o TLV), lo que dificulta el establecimiento de protocolos de seguridad para ambientes de trabajo. En relación con este punto, en 2006 se enunciaron cinco grandes retos para establecer una Nanotecnología segura.<sup>11</sup> Uno de ellos, que aún permanece como un objetivo inalcanzado, se refiere al desarrollo de instrumentos para determinar la exposición a nanomateriales, aunque se han realizado grandes avances en este terreno y ya existen instrumentos comerciales que miden la concentración de nanopartículas en aire. Sin embargo, lo que interesa no es el número total de nanopartículas a las que estamos expuestos,

sino el número de ENs con unas características determinadas. La tarea en este sentido es difícil dado que las nanopartículas producidas en los centros de investigación o en la industria a menudo resultan difíciles de distinguir de las ya presentes en el medio ambiente.

A los riesgos para la salud ya señalados hay que añadir el de incendios



y explosiones causados por la alta reactividad de muchos materiales cuando sus dimensiones se reducen a escala nanométrica. A este respecto, el comportamiento más notable es el carácter pirofórico de muchos materiales metálicos, provocando su ignición espontánea en aire cuando sus dimensiones se reducen por debajo de un cierto tamaño. Afortunadamente, en la mayor parte de los casos las cantidades de nanomateriales que se manejan son todavía de pequeña escala, lo que limita las posibles consecuencias de un accidente. Esta situación, sin embargo, está cambiando rápidamente, y ya hay empresas que fabrican nanomateriales

en cantidades de toneladas por año,<sup>12</sup> por lo que las consideraciones de seguridad deberán adaptarse rápidamente a un escenario con un inventario reactivo/explosivo mayor.

Todo lo anterior pone de manifiesto la necesidad de un conocimiento más profundo de los riesgos a los que nos enfrentamos en el manejo de nanomateriales. En ese sentido, el esfuerzo investigador para lograr una Nanotecnología segura ha ido aumentando significativamente. En los EE.UU., a partir del establecimiento de la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI) en el año 2000, se han puesto en marcha pro-

**“La evaluación de la toxicidad de los nanomateriales es compleja porque depende no solo de la composición química del material sino de factores tales como su tamaño, área superficial, forma, agregación, recubrimiento superficial y solubilidad.”**

10. Balas, F. y cols., Nature Nanotechnology 2010, 5, 93.

11. Maynard, A. D. y cols., Nature 2006, 444, 267.

12. Schmid, K. y cols. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 2253.

13. Sargent Jr., J. F. "Nanotechnology and Environmental, Health, and Safety: Issues for Consideration" Servicio de Investigación del Congreso. [http://assets.opencrs.com/rpts/RL34614\\_20110120.pdf](http://assets.opencrs.com/rpts/RL34614_20110120.pdf).

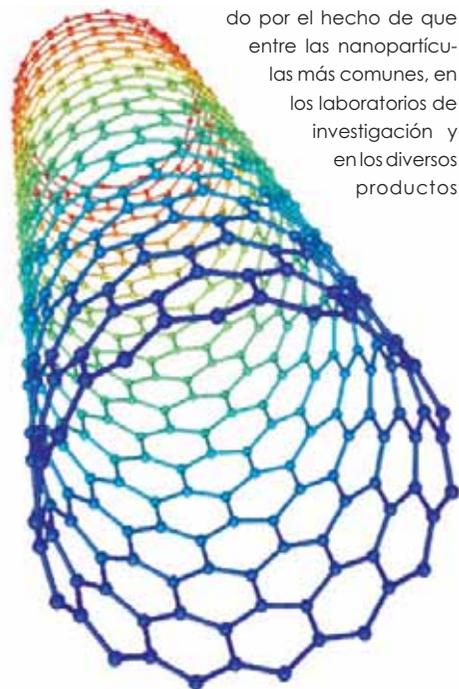
14. [http://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/pdf/ec-nanotechnology-research-mapping\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/ec-nanotechnology-research-mapping_en.pdf)

## Nanoseguridad: confrontando los riesgos de la Nanotecnología

yectos en materia de seguridad, salud y medio ambiente relacionados con la Nanotecnología que, para el año 2011, se estiman en 117 MM\$, lo que supondrá cerca del 7% del presupuesto para ese año de la NNI.<sup>15</sup> Por su parte, la Comisión Europea ha financiado más de treinta proyectos a diferente escala en los programas marco FP6 y FP7, dedicados a salud, seguridad y medio ambiente, relacionados con la Nanotecnología.<sup>14</sup> La inversión propuesta para este año 2011 en este campo ronda los 150 MM€.

En la Universidad de Zaragoza, dentro del Instituto de Nanociencia de Aragón y el CIBER-BBN, investigamos en el desarrollo de métodos para la monitorización y control de nanomateriales en el ambiente siguiendo dos líneas de trabajo principales: por un lado, se estudia el marcaje de ENs, para distinguirlos de las nanopartículas presentes en el ambiente, un problema que se ve complicado por el hecho de que

entre las nanopartículas más comunes, en los laboratorios de investigación y en los diversos productos



nanotecnológicos que se comercializan, están algunas de las más frecuentes en el medio ambiente, tales como el óxido de titanio o el óxido de silicio. Por otro lado, estudiamos los procesos de formación de aerosoles nanoparticulados y el comportamiento en cuanto a su dispersión en recintos cerrados. Para investigar estos aerosoles, se han puesto a punto instalaciones específicas que permiten realizar la dispersión de nanopartículas de forma segura, y facilitan la captura y eliminación posterior de los aerosoles formados.

En resumen, el esfuerzo investigador en nanoseguridad es clave para el desarrollo de la nanotecnología. Lejos de impedir el progreso de las tecnologías asociadas a los nanomateriales, pretende establecer métodos para que este progreso se lleve a cabo con respeto a la salud y la seguridad de los trabajadores, el público y el medio ambiente. Mientras no exista información específica sobre las características de peligrosidad de un determinado tipo de nanomateriales debe aplicarse el principio de precaución (es decir, considerarlo como si fuese un material peligroso), minimizando su manejo en seco y evitando su dispersión mediante el encerramiento de las operaciones, de acuerdo con lo que recomiendan las principales instituciones en este campo.<sup>15,16</sup> Debemos conseguir que, tal y como se vaticina, la Nanotecnología se convierta en la próxima revolución industrial pero que, a diferencia de revoluciones tecnológicas anteriores, lo consiga con el mayor respeto a la seguridad, la salud y el medio ambiente.

Francisco Balas y Jesús Santamaría  
Instituto de Nanociencia de Aragón  
Universidad de Zaragoza

Centro de Investigación Biomédica en Red  
en Bioingeniería, Biomateriales y  
Nanomedicina.

Una de las líneas de trabajo en el INA se centra en investigaciones sobre el manejo seguro de nanomateriales, incluyendo estudios de dispersión de aerosoles nanoparticulados.

- A) cámara de dispersión de nanopartículas, la caracterización de los nanomateriales.
- B) microscopio UHRTEM, o la idoneidad de elementos de protección personal y general para su uso con nanomateriales.
- C) máscaras y guantes para trabajo con nanopartículas.
- D) estructura de un filtro HEPA para una campana de laboratorio.



15. Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks "The Appropriateness of the Risk Assessment Methodology in Accordance with the Technical Guidance Documents for New and Existing Substances for Assessing the Risks of Nanomaterials" (European Commission, 2007).
16. National Institute of Occupational Safety and Health "Approaches to Safe Nanotechnology" (NIOSH, 2009).