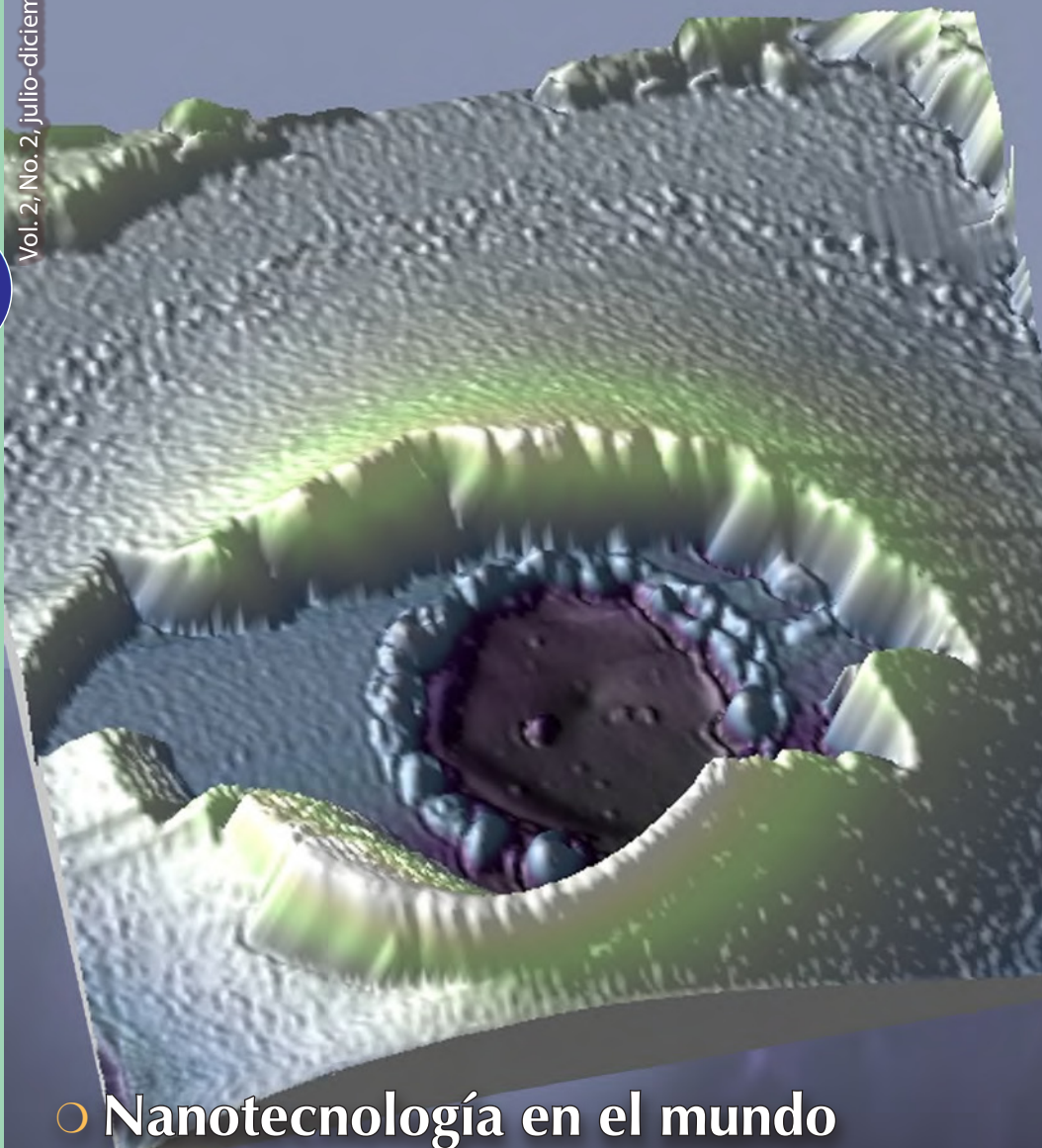




- Nanotecnología en el mundo farmacéutico
- Nanotecnología en agricultura
- Nanotecnología en España
- Aspectos legales de la nanotecnología



**Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria
en Nanociencias y Nanotecnología**

DIRECTORIO

UNAM

Dr. José Narro Robles

Rector

Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro

Secretario General

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz

Coordinador de la Investigación Científica

Dra. Estela Morales Campos

Coordinadora de Humanidades

Dr. Jaime Martuscelli Quintana

Coordinador de Innovación y Desarrollo

Dra. Norma Blazquez Graf

Directora del CEIICH

Dr. Sergio Fuentes Moyado

Director CNYN

Dr. José Saniger Blesa

Director CCADET

MUNDO NANO

Editores

Dr. Gian Carlo Delgado Ramos • giandelgado@unam.mx

Dr. Noboru Takeuchi Tan • takeuchi@cnyn.unam.mx

Comité Editorial

Física (teoría)

Dr. Sergio Ulloa • ulloa@ohio.edu

(Departamento de Física y Astronomía,
Universidad de Ohio. Estados Unidos)

Dr. Luis Mochán Backal • mochan@em.fis.unam.mx

(Instituto de Ciencias Físicas, UNAM. México)

Física (experimental)

Dr. Isaac Hernández Calderón •

Isaac.Hernandez@fis.cinvestav.mx

(Departamento de Física, Cinvestav. México)

Ingeniería

Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro

• SALcocerM@iingen.unam.mx

(Instituto de Ingeniería, UNAM. México)

Microscopía

Dr. Miguel José Yacamán • miguel.yacaman@utsa.edu

(Departamento de Ingeniería Química,
Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos)

Catálisis

Dra. Gabriela Díaz Guerrero • diaz@fisica.unam.mx

(Instituto de Física, UNAM. México)

Materiales

Dr. Roberto Escudero Derat • escu@servidor.unam.mx

(Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. México)

Dr. José Saniger Blesa • jose.saniger@ccadet.unam.mx

(Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico,
UNAM. México)

Filosofía de la Ciencia

Dr. León Olivé Morett • olive@servidor.unam.mx

(Instituto de Investigaciones Filosóficas, UNAM. México)

Ciencia, tecnología y género

Dra. Norma Blazquez Graf • blazquez@servidor.unam.mx

(Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y
Humanidades, UNAM. México)

Ciencia, tecnología y sociedad

Dr. Louis Lemkow • Louis.Lemkow@uab.es

(Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental,
Universidad Autónoma de Barcelona. España)

Complejidad de las ciencias

Dr. José Antonio Amozurrutia • amoz@labcomplex.net

(Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y
Humanidades, UNAM. México)

Dr. Ricardo Mansilla Corona • mansy@servidor.unam.mx

(Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y
Humanidades, UNAM. México)

Medio ambiente, ciencia y tecnología

Dra. Elena Álvarez-Buylá • eabuylla@gmail.com

(Instituto de Ecología, UNAM. México)

Aspectos éticos, sociales y ambientales

de la nanociencia y la nanotecnología

Dr. Roger Strand • roger.strand@svt.uib.no

(Centro para el Estudio de las Ciencias y la Humanidades,
Universidad de Bergen. Noruega)

Dr. Paulo Martins • marpaulo@ipt.br

(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de
São Paulo, Brasil)

Mtra. Kamilla Kjolberg • kamilla.kjolberg@svt.uib.no

(Centro para el Estudio de las Ciencias y la Humanidades,
Universidad de Bergen. Noruega)



es una publicación semestral de la Universidad Nacional Autónoma de México, editada por el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico; el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades; el Centro de Nanociencia y Nanotecnología y el Proyecto Universitario de Nanotecnología Ambiental.

Vol. 2, No. 2, México, julio-diciembre, 2009.

D.R. © Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología.

Registro en trámite.

Cuidado de la edición: Concepción Alida Casale Núñez

Número financiado parcialmente por el proyecto PAPIIME de la DGAPA-UNAM No. PE100709 y por el proyecto No. 117258 del CONACyT-Gobierno del Estado de Baja California.

www.mundonano.unam.mx

CONTENIDO

4 EDITORIAL

6 NOTICIAS

- 06 Científicos desarrollan una nanolente que logra imágenes con súper-resolución
- 07 Diseña la UNAM nanocatalizadores más eficientes para reducir la contaminación automotriz
- 08 Nanoalambres de silicio para entregar biomoléculas en células vivas
- 09 Nanosensores para medir biomarcadores de cáncer en sangre entera
- 09 Abriendo una compuerta para la electrónica molecular
- 10 La sorprendente reactividad del nano-oro puede ser debida parcialmente al soporte del óxido de titanio
- 11 Baterías de tejidos con nanotubos
- 12 Se propone la primera Ley de Seguridad en Nanotecnología

13 ARTÍCULOS

- 13 Nanomedicinas: la disrupción de la nanotecnología en el mundo farmacéutico
Eder Lilia Romero y María José Morilla
- 27 Ética para nanomedicina: primera propuesta para la elaboración de un código
Tessy Ma. López Goerne y Antonio Paoli Bolio
- 43 Simulación por computadora de nanomateriales para la conversión de energía solar
Yosuke Kanai
- 50 La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados
Rogelio Carrillo González y Ma. del Carmen A. González-Chávez
- 64 Diseño genético de aceros endurecidos por nanoprecipitados
Pedro E. J. Rivera Díaz del Castillo
- 74 La implantación de la nanotecnología en España: muchas luces y algunas sombras
Pedro A. Serena

- 91 Hacer nanociencia en Cuba: entre lo propio y lo impropio
Rogelio G. Díaz Méndez
- 100 Educación para el futuro: el ingeniero nanotecnólogo
Laura Viana Castrillón

110 RESEÑAS

- 110 *Nanotechnology legal aspects*
Patrick Boucher

120 LIBROS E INFORMES

- 120 *Nanomedicine. Nanotechnology for health*
- 122 Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mejor mundo átomo por átomo
Noboru Takeuchi
- 123 *Out of the laboratory and onto our plates. Nanotechnology in food & agriculture*
- 124 *Nanotechnology in agrifood sector*
Market Report
- 125 *Nanotechnologies and food*
- 126 *Opinion on the ethical aspects of nanomedicine*
- 127 *Nano meets macro. Social perspectives on nanoscale sciences and technologies*

128 IMÁGENES

- 128 Células rojas infectadas de malaria humana (*Plasmodium malariae*)
- 129 Átomos dispersos en patrón de parches
- 130 Nanopesca en temporada invernal

131 INSTRUCTIVO PARA AUTORES

132 EVENTOS

Fe de erratas:

En el ejemplar correspondiente a la temporada enero-junio, 2009

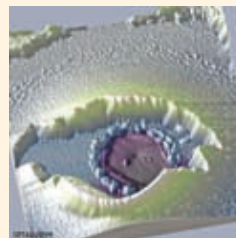
Dice: Vol. 1, No. 2.

Debe decir: Vol. 2, No. 1.

Correspondencia:

Mundo Nano. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. Torre II de Humanidades, 4º piso. Ciudad Universitaria. CP. 04510. México, D.F. México.

▼ Imagen de la portada: Caverna multicapa, resultante de la destrucción por incineración del recubrimiento, detectada en la superficie de un lente después de su uso en un resonador láser. Autora: Sviatlana Abetkovskaja, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute. (Véase pág. 130)



El carácter interdisciplinario de la nanociencia y la nanotecnología ha llevado a desarrollar formas de trabajo colaborativas bajo la figura de grupos y redes de trabajo a diversas escalas, sean inter-institucionales o multinstitucionales.

En Estados Unidos, Alemania, Francia, Reino Unido, Japón, y también en América Latina se han impulsado programas de estímulo a partir de la conformación de redes. Por ejemplo, en Brasil se creó, en diciembre de 2004, la *Rede BrasilNano*, misma que a su vez fue conformada por 10 redes de trabajo: 1) en fotónica; 2) en nanobiotecnología y sistemas nanoestructurados; 3) en nanotecnología molecular y de interfaces; 4) en nanotubos de carbono; 5) en nanocosméticos; 6) en microscopía de barrido electrónico; 7) en simulación y modelización de nanoestructuras; 8) en recubrimientos nanoestructurados; 9) en nanoglicobiotecnología y, 10) en nanobiomagnetismo.

En México, a finales de 2009, se conformó también una red de trabajo en el marco de las convocatorias del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Si bien no es una red que cuente con financiamiento para la investigación y compra de equipo *per se* (como sí sucede en Brasil y en otros países que ya tienen una Iniciativa Nacional en Nanotecnología), sí cuenta con fondos para la movilidad de investigadores y estudiantes, así como para la realización de encuentros y otros eventos académicos. La *Red NyN* del Conacyt (www.nanored.org.mx) está conformada por decenas de investigadores y está dirigida actualmente por un comité conformado por investigadores del Centro de Nanociencias y Nanotecnología, UNAM Ensenada (Baja California), el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Chihuahua), el Instituto de Astrofísica Óptica y Electrónica (Puebla), el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Estado de México), el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (San Luis Potosí) y el Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad, Cinvestav Irapuato (Guanajuato). Las líneas de investigación de la red se definirán en el sentido de cubrir el grueso del potencial que tiene la comunidad científicotecnológica del

país; buscarían cubrir los nichos de innovación con mayor oportunidad; y buscarían consolidar aún más a la comunidad nano, especialmente en el mediano plazo.

Desde *Mundo Nano*, consideramos que en un contexto de escasos recursos y amplias áreas de investigación aún por cubrir, incluyendo los aspectos éticos, legales, sociales y ambientales de la nanotecnología, lo más pertinente es la consolidación de una comunidad nano, bien articulada, colaborativa y responsable. En ese sentido, la Red NyN puede fungir como catalizador para relanzar la investigación en NyN a otro nivel, incluyendo aspectos relacionados con la importantísima labor de educar a las nuevas generaciones de científicos, tecnólogos e ingenieros, así como también en cuanto a informar y dialogar con la sociedad.

La Red NyN puede pues ser un elemento más que consolide una plataforma de avance positivo y responsable de la NyN sin que ello implique la exclusión y la necesidad de otras redes y grupos de trabajo que puedan vincularse o trabajar de modo independiente. De hecho, en el país ya existen este tipo de redes interinstitucionales como la Red de Grupos de Investigación en Nanociencias en México de la UNAM (www.nano.unam.mx), la red Nanociencias UAM (www.nanocienciasuam.com.mx), el Proyecto Universitario de Nanotecnología Ambiental (www.cic-ctic.unam.mx/cic/mas_cic/megaproyectos/impulsa_1.cfm), o la División de Nanociencia y Nanotecnología de la Sociedad Mexicana de Física (www.smf.mx).

Creemos que las divisiones, el aislacionismo y la confrontación es algo indeseable y ciertamente costoso. Lo importante del trabajo en redes y grupos de trabajo es estimular la cooperación y la colectividad de la mejor manera posible más allá de las diferencias personales o profesionales que de hecho existen en la comunidad científica y tecnológica.

Con esto no se pretende avalar el proyecto de la Red NyN, que todavía deberá demostrar su viabilidad, capacidad y potencial. En cambio, lo que se busca resaltar es que ésta bien puede ser un avance de importancia, entre otros que puedan irse consolidando en el camino. Lo central es que

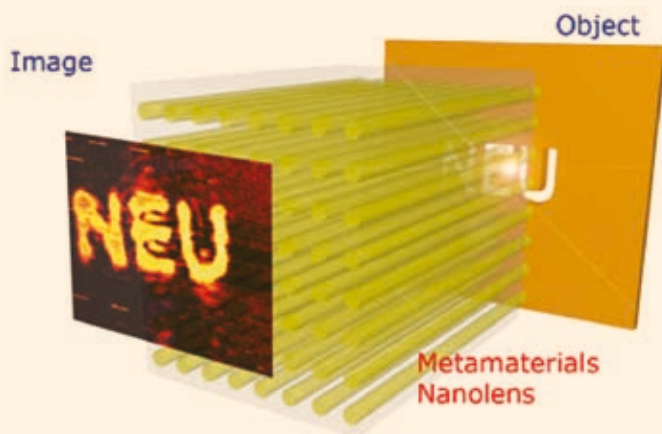
en el ejercicio de hacer ciencia y tecnología, no se olvide que el objetivo, lejos de ser la innovación por la innovación, es la resolución de problemas concretos que aquejan a la población. Además, debe resaltarse que el quehacer científico tecnológico debe ser ética y socialmente responsable. Esto implica que en momentos de crisis como los que vivimos, lo que se requiere es un tejido de científicos (de las ciencias exactas, naturales y sociales), tecnólogos e ingenieros cada vez más unido. Sobre todo, cuando los datos nos indican que la ciencia y la tecnología en el país son “zona de desastre”, tal y como fue suscrito por múltiples expertos en el marco del encuentro “La Ciencia en

México, Zona de Desastre” convocado por la Academia Mexicana de Ciencias, celebrado el 17 de junio de 2009. Y es que la estimación del número de patentes generadas por México lo evidencia, pues el país aporta sólo el 0.2% de las mismas a nivel mundial. Además, con base en datos de 2006, el 98.6% de las patentes otorgadas fueron a nombre de no-residentes, cifra mayor a la de Brasil, donde el porcentaje es de 90.5%. Por su parte, las cifras de recaudación por concepto de regalías y derechos de licencias en México, mismas que en 2005 registraron 70 centavos de dólar por persona, en Chile fueron de 3.30 dólares y en EUA de 191.50 dólares.

GIAN CARLO DELGADO
NOBORU TAKEUCHI
Editores

▼ 17 de enero de 2010

Científicos desarrollan una nanolente que logra imágenes con súper-resolución



Fuente: Imagen tomada de *Applied Physics Letters*.

El descubrimiento usa un arreglo de nanoalambres para observar nano-objetos, más allá del límite de difracción.

Un equipo de investigación de la Universidad de Northeastern ha desarrollado un nuevo nanolente que puede superar el límite de difracción para lograr la súper-resolución, mejor de lo que puede lograrse con la tecnología actual. El nanolente está hecho de arreglos de nanoalambres de los llamados metamateriales, o sea, materia-

les que no se pueden encontrar en la naturaleza. La investigación fue llevada a cabo por el equipo dirigido por Srinivas Sridhar, Ph.D., profesor distinguido y director del Instituto de Investigaciones en Materiales Electrónicos, Universidad de Northeastern. Las lentes convencionales construyen una imagen de un objeto usando las ondas ordinarias, dejando a un lado la información de los detalles finos y pequeños de un objeto, contenidos en las ondas

evanescentes. Es por esto que los sistemas ópticos convencionales no pueden obtener imágenes precisas de objetos muy pequeños en la nanoescala. Usando un procedimiento diferente, el grupo de investigación organizó y empacó los nanoalambres para diseñar un nuevo tipo de lente. Alineando y ordenando millones de nanoalambres, cada uno de 20 nanómetros de diámetro, pudieron controlar la forma en que la luz pasa a través del lente, logrando obtener una imagen clara y de alta resolución del nano-objeto, gracias a que usa tanto las ondas ordinarias como las evanescentes para construir la imagen.

Los investigadores esperan que la tecnología pueda usarse para mejorar las técnicas de litografía.

§

Referencia: “Super-resolution imaging using a three-dimensional metamaterials nanolens”. *Appl. Phys. Lett.* 96, 023114 (2010); doi:10.1063/1.3291677.

▼ 04 de enero de 2010

Diseña la UNAM nanocatalizadores más eficientes para reducir la contaminación automotriz

La primera generación de nanocatalizadores hechos en México para mejorar los convertidores catalíticos de los automóviles, ya se diseña en la UNAM.

La tecnología, cuya meta es reducir las emisiones contaminantes de los automotores a la atmósfera, se desarrolla en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNYN) de esta casa de estudios, campus Ensenada, en Baja California.

“Buscamos que sean catalizadores más eficientes, resistentes y baratos que los que existen actualmente en el mercado. Por ello, desde su diseño y planeación están pensados bajo el concepto nano, que mejora algunas propiedades de estas tecnologías” —comentó en entrevista Sergio Fuentes Moyado, director del CNYN y titular del proyecto.

En el equipo también participan Andrey Simakov y Felipe Castillón, quienes junto con Fuentes Moyado trabajan desde 2004 en el desarrollo de nanocatalizadores que contribuyan a reducir esas emisiones.

Los investigadores tienen lista una formulación que se tramitará próximamente como patente por parte de la Coordinación de Innovación y Desarrollo de la UNAM.

“El plan es tener listos en 2010 los prototipos que se probarán en condiciones reales en un laboratorio especializado de Estados Unidos, el único en su

tipo que tiene relación directa con la industria automotriz” —explicó Fuentes Moyado, ingeniero y doctor en ciencias físicas.

La tecnología del CNYN forma parte de la quinta generación de convertidores catalíticos, y es la primera pensada desde su origen como nanotecnología.

“Buscamos que las fases del catalizador colaboren a nivel nanométrico para mejorar las características del proceso. Ésa es la característica principal” —señaló el investigador.

SUSTITUYEN AL RODIO

Los componentes tradicionales de los convertidores catalíticos son metales nobles como el platino, el paladio y el rodio.

“En los últimos años, se ha buscado hacer catalizadores que contengan dos metales, en lugar de tres, para eliminar el más caro, que es el rodio. Pero deben distribuirse espacialmente y no usarse en aleación, pues las propiedades disminuyen si los metales se combinan” —aclaró el experto.

En los catalizadores convencionales el rodio disminuye los óxidos de nitrógeno, contaminantes nocivos con los que se forma el smog fotoquímico, que produce ozono en una cadena de reacciones químicas cuyas emisiones dañan la atmósfera.

En su nanotecnología, los especialistas de la UNAM han desarrollado formulaciones para sustituir ese elemento.

“Utilizamos unos soportes con ciertas características que, combinados en diferente relación y a nivel nanométrico, pueden compensar la eliminación de los óxidos de nitrógeno. Usamos componentes como óxidos de ceria, circonita y lantana, así como algunos aditivos de tierras raras para ayudar a que ocurran reacciones de descomposición del óxido de nitrógeno; eso permite abaratar costos de producción del catalizador, manteniendo una misma eficiencia y sustituyendo el rodio” —explicó.

En su laboratorio de Ensenada, los científicos de la UNAM tienen micro reactores para determinar cuál es la conversión de los gases contaminantes y qué tan eficiente es el catalizador.

“Debemos complementar esta investigación con otro tipo de información, donde se simulen las mismas condiciones que salen de un escape de motor y eso aún no lo tenemos. Ahora lo hacemos en colaboración con otros grupos, hemos logrado evaluarlos y funcionan bien”.

Para que los nanocatalizadores estén listos, falta una última prueba antes de decidir si se pueden usar comercialmente.

“Se hace en Estados Unidos, porque no hay otro lugar donde se pueda efectuar. Son laboratorios asociados con las empresas de automóviles. Ellos tienen estrategias para probar en condiciones severas, de alta temperatura y cantidades im-

portantes de azufre. Si nuestro prototipo pasa ese análisis se decide la aplicación” —señaló Fuentes Moyado.

El director del CNYN aseguró que los nanocatalizadores de la UNAM, desarrollados a partir de 2004, serán competi-

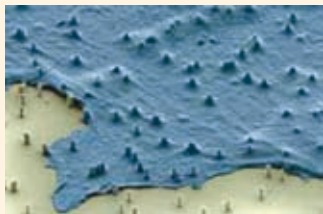
tivos a nivel mundial, eficientes y de bajo costo por la sustitución del rodio.

§

Consúltese: www.dgcs.unam.mx/boletín/2010_007.html.

▼ 13 de enero de 2010

Nanoalambres de silicio para entregar biomoléculas en células vivas



Fuente: Imagen tomada por el Prof. Hongkun Park, Harvard.

Muchos experimentos en biología se basan en la manipulación de células: por ejemplo, se les adiciona un gene, una proteína o una molécula para estudiar los efectos en la célula. Sin embargo, introducir una molécula en una célula no es trabajo fácil y muchas veces se logra usando trucos biológicos, tales como infectar la célula con

un virus o pegar una proteína a otra que pueda entrar con facilidad a través de la membrana de la célula. Muchos de estos métodos son específicos de ciertos tipos de células y solamente funcionan para algunas moléculas. Una nueva investigación ofrece una alternativa sorprendentemente sencilla y directa: usar nanoalambres como agujas para introducir las moléculas en las células. Los investigadores han descubierto que las células pueden ser crecidas sobre una serie de nanoalambres verticales de silicio, sin que haya un daño aparente de las células. Las células se hunden en los nanoalambres y en el lapso de una hora son atravesadas por los clavos pe-

queños. Aunque las células estén descansando en esta “cama de agujas” pueden continuar creciendo y dividirse normalmente. Este arreglo permite tener una interfase directa con el interior de las células a través de los nanoalambres. De acuerdo con los autores, en teoría, se puede colocar casi cualquier molécula en casi cualquier clase de célula.

§

Referencia: *Vertical silicon nanowires as a universal platform for delivering biomolecules into living cells*. PNAS, publicado en línea antes de su impresión en enero 11, 2010, doi: 10.1073/pnas.0909350107.

▼ 14 de diciembre de 2009

Nanosensores para medir biomarcadores de cáncer en sangre entera

Un equipo de investigación ha utilizado por primera vez nanosensores para medir los biomarcadores de cáncer en la sangre. Sus resultados podrían simplificar la forma como los médicos revisan los biomarcadores de cáncer y otras enfermedades. Se utilizan sensores hechos de nanoalambres para detectar y medir las concentraciones de dos biomarcadores específicos: uno para el cáncer de próstata y el otro para el cáncer de mama. La sangre es una solución complicada la cual contiene proteínas, iones

y otras sustancias que pueden afectar la detección. Para lograr su objetivo, los investigadores desarrollaron un novedoso dispositivo que actúa como filtro, capturando los biomarcadores, en este caso los antígenos específicos de la próstata y cáncer de mama, en un chip, mientras se lava el resto de la sangre. La acumulación de los antígenos en el chip permite detectar hasta concentraciones muy pequeñas, del orden de picogramos por mililitro, con 10 por ciento de exactitud.



Fuente: Imagen tomada por el Prof. Mark Reed de la Universidad de Yale.

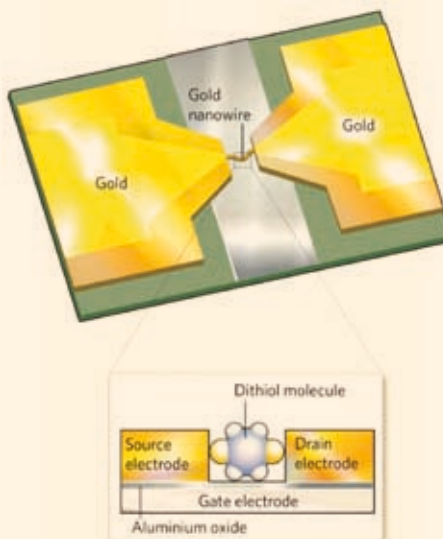
§

Referencia: "Label-free biomarker detection from whole blood", en *Nature Nanotechnology* (14/X11/2009). Publicado en línea el 13 de diciembre de 2009.

▼ 6 de enero de 2010

Abriendo una compuerta para la electrónica molecular

Un grupo de investigadores ha mostrado que la corriente que pasa por un transistor hecho de una sola molécula puede ser regulada ajustando las energías de sus orbitales moleculares. Esta observación lleva la electrónica molecular más cerca de comportarse como los convencionales dispositivos basados en silicio. Ellos usaron una serie de técnicas espectroscópicas para probar que los dispositivos eran verdaderos transistores de una sola molécula. También mostraron que la aplicación de un voltaje externo modulaba la corriente al cambiar los niveles de energía del orbital molecu-



Fuente: Revista *Nature*.

lar de esas moléculas y, además, que diferentes moléculas se comportaban de manera diferente, dependiendo de los niveles de energía de sus orbitales. Para construir el transistor, los científicos necesitaron atrapar a las moléculas en pequeñas separaciones entre los electrodos fuente y de drenaje. Usaron electromigración, don-

de grandes corrientes pasan a través de nanoalambres de oro, haciendo pequeñas pausas cuando los átomos de oro se movían alrededor. Si los nanoalambres son recubiertos con las moléculas que se quieren probar, entonces, algunas veces, cuando las separaciones se forman, las moléculas quedan atrapadas entre los dos extre-

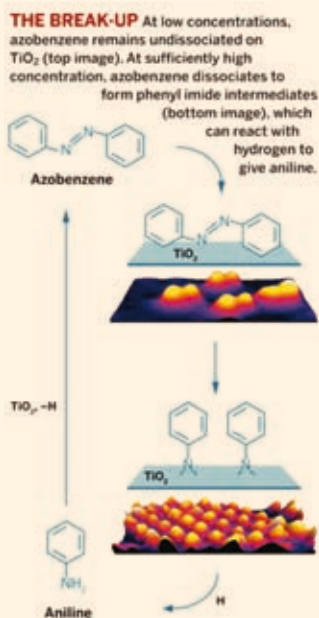
mos. Todo este arreglo descansa sobre una base de óxido de aluminio, el cual actúa como el electrodo de compuerta.

§

Referencia: "Observation of molecular orbital gating", en *Nature* 462, 1039-1043 (24/XII/2009), doi:10.1038/nature08639.

▼ 5 de enero de 2010

La sorprendente reactividad del nano-oro puede ser debida parcialmente al soporte del óxido de titanio



Las nanopartículas de oro, una clase más o menos nueva de catalizadores sorprendentemente activos, pueden deber aspectos clave de su habilidad catalítica al óxido de titanio (TiO_2) en el que normalmente descansan. En el inesperado descubrimiento de hace varios años, se encontró que un metal inerte como el oro, puede funcionar como un catalizador activo si se prepara en forma de nanopartículas. Lo anterior desencadenó una oleada de investigaciones sobre las propiedades catalíticas de metales preciosos. Sin embargo, los investigadores informan ahora

que el óxido de titanio (sin necesidad del oro) facilita los pasos clave en las reacciones de interconversión entre la anilina y el azobenceno y que el papel del oro, al menos en esas reacciones, puede ser simplemente para activar el oxígeno o el hidrógeno.

§

Referencia: "Reactivity of TiO_2 Rutile and Anatase Surfaces toward Nitroaromatics", en *J. Am. Chem. Soc.*, Article ASAP DOI: 10.1021/ja907865t. Fecha de la publicación en línea: 9 de diciembre de 2009.

Fuente: Imagen del Prof. Shao-Chun Li, de la Universidad de Tulane.

▼ 25 de enero de 2010

Baterías de tejidos con nanotubos

Utilizan nanotubos de carbono para fabricar baterías a partir de tejidos. Se han convertido tejidos normales de algodón y poliéster en baterías que conservan su flexibilidad. Esta demostración constituye un impulso para el emergente campo de las “prendas electrónicas” en el que los dispositivos están integrados en la ropa y los textiles. El enfoque, que se basa en sumergir los tejidos en una “tinta” de diminutos tubos de carbono, se demostró por primera vez el año pasado en papel de fotocopidora. La nueva aplicación a los tejidos se describe en la revista *Nano Letters*. Según los investigadores: “Las prendas electrónicas representan una nueva clase de materiales en desarrollo (...) que permiten muchas aplicaciones y diseños antes imposible con las tecnologías de la electrónica tradicional”.

Una serie de iniciativas de investigación en los últimos años ha demostrado la posibilidad de desarrollar dispositivos electrónicos que se pueden incorporar en superficies flexibles e incluso transparentes.

Sin embargo, la integración de la electrónica en los tejidos ha presentado desafíos distintos, especialmente en cuanto al desarrollo de en-

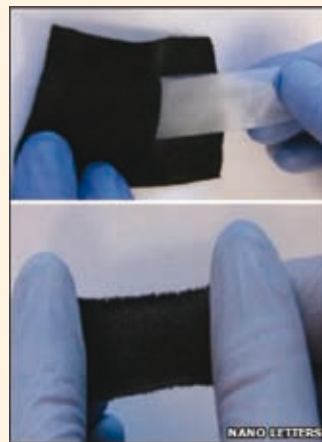
foques que funcionen con tejidos normales.

Ahora, Yi Cui y su equipo de la Universidad de Stanford, en los EUA, han demostrado que su “tinta” hecha de nanotubos de carbono —cilindros de carbono con un diámetro de apenas unas mil millonésimas partes de un metro— puede servir como tinte para convertir fácil y económicamente una camiseta normal en una “camiseta electrónica”.

La idea es la misma que describen en su trabajo con papel normal, las fibras entrelazadas de los tejidos, al igual que las del papel, son especialmente apropiadas para absorber la tinta de nanotubos, manteniendo una conexión eléctrica en toda la superficie de una prenda.

La tela simplemente se sumerge en tinta de nanotubos y, a continuación, se presiona para disminuir su grosor e incluso eliminar el revestimiento.

El tejido mantiene sus propiedades aunque se estire o se doble. Incluso aclarar las muestras en agua y retorcerlas para escurrir el agua no cambia sus propiedades electrónicas. “Nuestro enfoque es sencillo y barato, al mismo tiempo que produce un gran rendimiento” —señaló la profesora Cui para BBC News.



Fuente: BBC Technology. Página: <http://www.euroresidentes.com/Blogs/nanotecnologia/avances.htm>.

“Los tejidos y el papel son dos tecnologías con mil años de historia. Nosotros hemos combinado una ‘alta’ tecnología —la nanotecnología— con la tecnología tradicional para producir nuevas aplicaciones”.

El siguiente paso será combinar el enfoque con materiales que almacenen más energía, para crear baterías más útiles.

§

Fuente: <http://www.euroresidentes.com/Blogs/nanotecnologia/avances.htm>. BBC Technology.

▼ 21 de enero de 2010

Se propone la primera Ley de Seguridad en Nanotecnología



El 21 de enero, el senador Mark Pryor propuso, junto con el senador Benjamin Cardin, la Ley de Seguridad en Nanotecnología 2010 (S.2942). El propósito es regular la nanotecnología para, entre otras cosas, permitir que la Federal Drug Administration (FDA) tenga las herramientas y los recursos para asegurarle al público que las medicinas y otros produc-

tos y dispositivos médicos, así como los aditivos para alimentos basados en nanotecnología, sean seguros y efectivos. El objetivo: que ello se determine sobre la base de conocimiento científico e información específica para cada tecnología y producto.

La propuesta de Ley es modificar el Capítulo X de la Ley Federal de Alimentos, Drogas y Cosméticos con la adición de la sección 1011, en la que se establece un programa dentro de la FDA para que investigue: a) nanomateriales incluidos o con intenciones de ser incluidos en productos regulados por la FDA; b) la potencial toxicidad de esos nanomateriales; c) los efectos de nanomateriales en sistemas biológicos y, d) la interacción de nanomateriales con sistemas biológicos. Asimismo, se sugiere incluir la revisión de la literatura e in-

formación sobre la interacción general de los nanomateriales con sistemas biológicos y sobre nanomateriales que en particular le preocupan a la FDA; el desarrollo y sistematización de la información, la promoción de esfuerzos de colaboración para medir y detectar nanomateriales, pero también para entender las propiedades de nanomateriales que podrían ser tóxicos; estimular la participación de la FDA en acciones para la sistematización nacional e internacional; entre otras cuestiones.

El presupuesto que establece la Ley para tal programa y acciones es de 25 millones de dólares al año, a partir del 2011 y hasta el 2015.

§

Véase: <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/R?r111:FLD001:S50125>.

Nanomedicinas: la disrupción de la nanotecnología en el mundo farmacéutico

EDER LILIA ROMERO* Y MARÍA JOSÉ MORILLA**

NANOTECNOLOGÍA Y NANO-OBJETOS

La nanotecnología es definida por la National Nanotechnology Initiative (NNI) [1] como “El desarrollo de investigación y tecnología a nivel atómico, molecular o macromolecular en la escala de tamaño de aproximadamente 1- 100 nanómetros (nm) (donde 1 nm es 10^{-9} metros) para la creación y uso de estructuras, aparatos y sistemas con nuevas propiedades y funciones debidas a su tamaño, así como la capacidad de controlar o manipular material a escala atómica”, en tanto que la Royal Society & Royal Academy of Engineering. Nanosciencie and Nanotechnologies, en su documento *Opportunities and Uncertainties*, indica más brevemente que la nanotecnología es “la capacidad de manipular efectos físicos, típicamente fenómenos cuánticos, que ocurren en nano-objetos”.¹ Los nanobjetos, por otro lado, han sido recientemente definidos como toda estructura que presente una, dos o tres dimensiones en la escala de tamaños entre 1 y 100 nm.²

NANO-OBJETOS + MEDICINA = NANOMEDICINA

Como se ilustra en la figura 1 no existe límite en la naturaleza del material de partida empleado en la preparación de nano-objetos. Sin embargo, es importante señalar que una vez en contacto con tejidos biológicos, las nuevas propiedades de los nano-objetos no necesariamente se acotarán a la manifestación de fenómenos cuánticos. De hecho, en presencia de células, la relevancia de sus nuevas propiedades no se manifestará como fenómenos cuánticos, sino mediante su reconocimiento y captura por mecanismos de fagocitosis y pinocitosis celulares. Asimismo, los nano-objetos exhibirán capacidad para cruzar barreras anatómicas y fenomenológicas, como el tracto gastrointestinal, las mucosas en general, la piel y la barrera hematoencefálica. En otras palabras, una vez en contacto con seres vivos, tejidos *ex vivo* o cultivos celulares, los nano-objetos pueden funcionar como herramientas capaces de ejecutar acciones programadas en forma controlada. Por ello, en su definición más breve, la nanomedicina sería la *aplicación de nano-objetos a la medicina*. Las siguientes plataformas tecnológicas conforman la nanomedicina: en primer lugar (por tamaño de mercado,

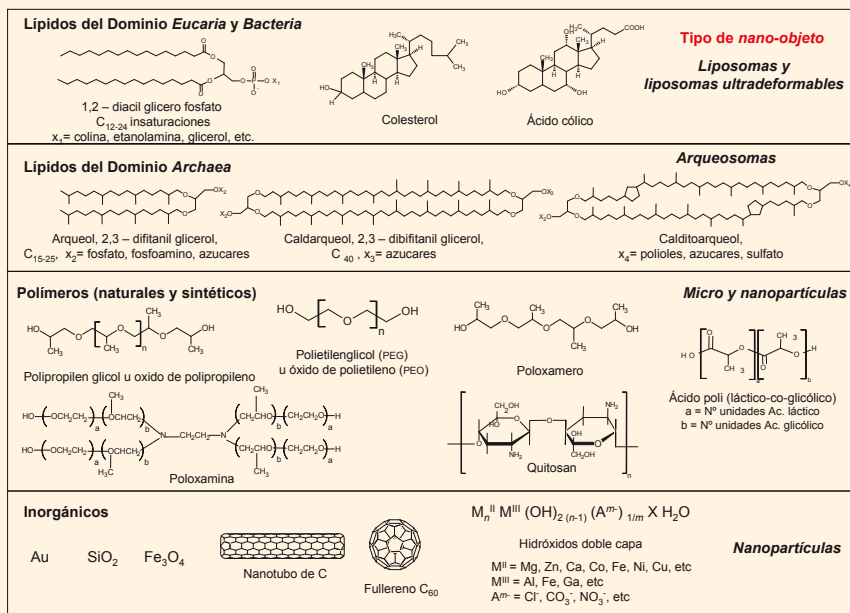
* Directora del PNM-UNQ: Programa de Nanomedicina- www.ldtd.unq.edu.ar - Universidad Nacional de Quilmes, Roque Saenz Peña 180, Bernal 1876, Buenos Aires, Argentina.

** PNM-UNQ.

¹ Royal Society, London 2004.

² WG1 Terminología y Nomenclatura, 15 agosto 2008. Primer Norma ISO/TC229: ISO/TS 27687 “Nanotechnologies -Terminology and definitions for nano-objects- nanoparticle, nanofibre and nanoplate”.

FIGURA 1. Materiales empleados en la preparación de nano-objetos



número de publicaciones y patentes a nivel mundial), la de diseño y aplicación de nano-sistemas de entrega de drogas (nano-sed)), siendo la nanotecnología farmacéutica el conjunto de tecnologías que permite fabricar nano-objetos capaces de ejecutar alguna de las acciones propias del área de la tecnología farmacéutica. Las restantes plataformas son aquellas relativas al diseño de nanosistemas de imágenes, de nuevos materiales, aparatos y sistemas, y de aspectos vinculados con la clínica, la nanotoxicología (es decir, el estudio de los efectos tóxicos causados por nano-objetos (figura 2)) y regulación de prácticas de manufactura y aplicación.

La definición física de la nanotecnología limita el tamaño de los nano-objetos a la cota superior de los 100 nm. Sin embargo, en un contexto biológico, las nuevas propiedades arriba mencionadas pueden mantenerse hasta por lo menos los 200-300 nm. La definición de nano-objeto, por otro lado, excluye las moléculas convencionales, cuya estructura no está manipulada en la nanoescala para conseguir nuevas propiedades dependientes de su dimensión.

¿NANO-OBJETOS Y FARMACIA?

Definidos de esta forma, los nano-objetos parecerían ser sofisticados productos de la físicoquímica, alejados de toda pertinencia farmacéutica. Pero la conexión entre nano-objetos, farmacia y el concepto de medicamento, emerge al vislumbrar que las nuevas propiedades de los nano-objetos (capacidad de ingreso a células por mecanismos fago/pinocíticos y de cruce de barreras) (figura 3), podrían aprovecharse para transportar y entregar drogas que hubieran sido incorporadas a su estructura. De he-

FIGURA 2. Diagrama de flujo para el análisis toxicológico de nano-objetos empleados como nano-sed

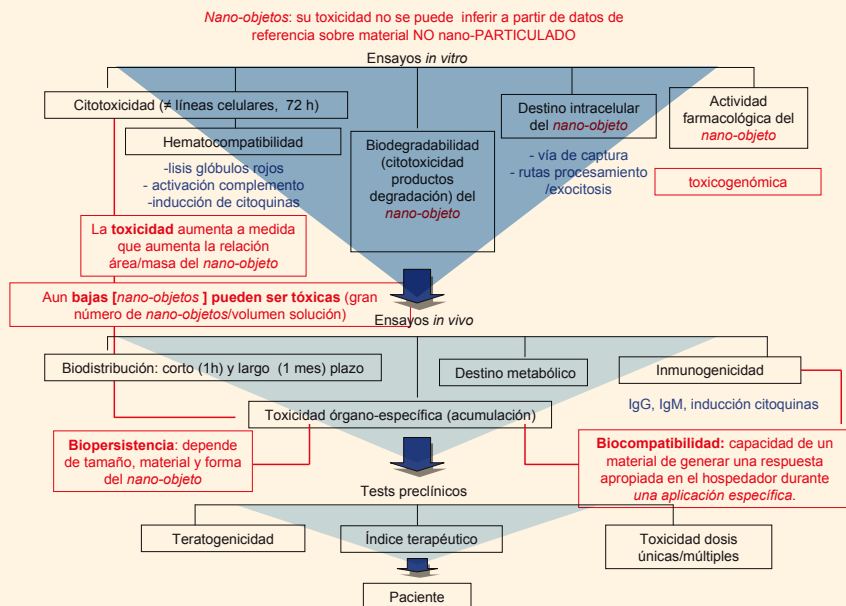


Figura 3. a) Modalidades de captura celular de nano-objetos. **b)** rutas intracelulares seguidas luego de la captura pinocítica de nano-objetos/nano-sed.

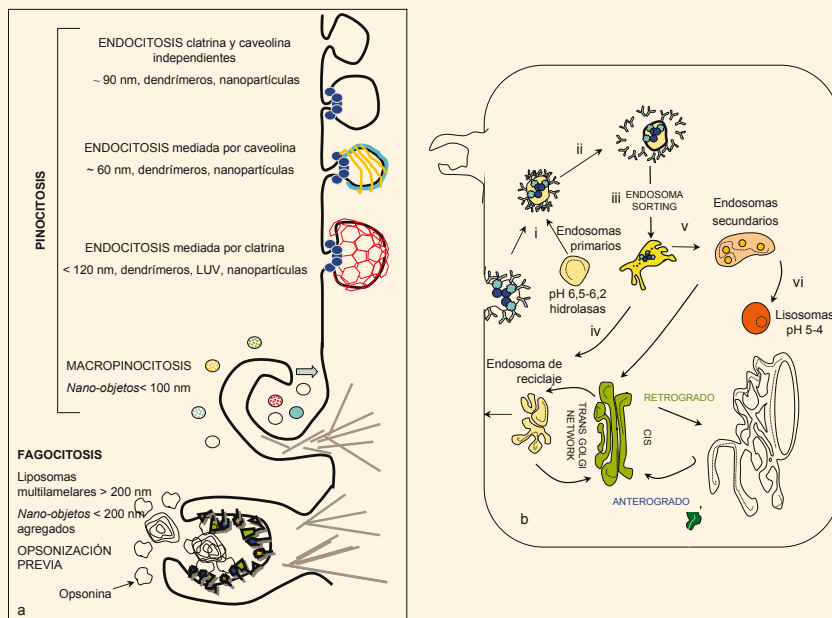


FIGURA 4. Rutas de administración de nano-objetos/nano-sed y barreras anatómicas

a) Ruta endovenosa (i.v): Los nano-objetos/nano-sed se inyectan directamente en circulación sanguínea sistémica (nano-objetos rígidos o sólidos deben tener diámetro menor de 3×10^4 nm para evitar bloqueo del lecho capilar pulmonar).

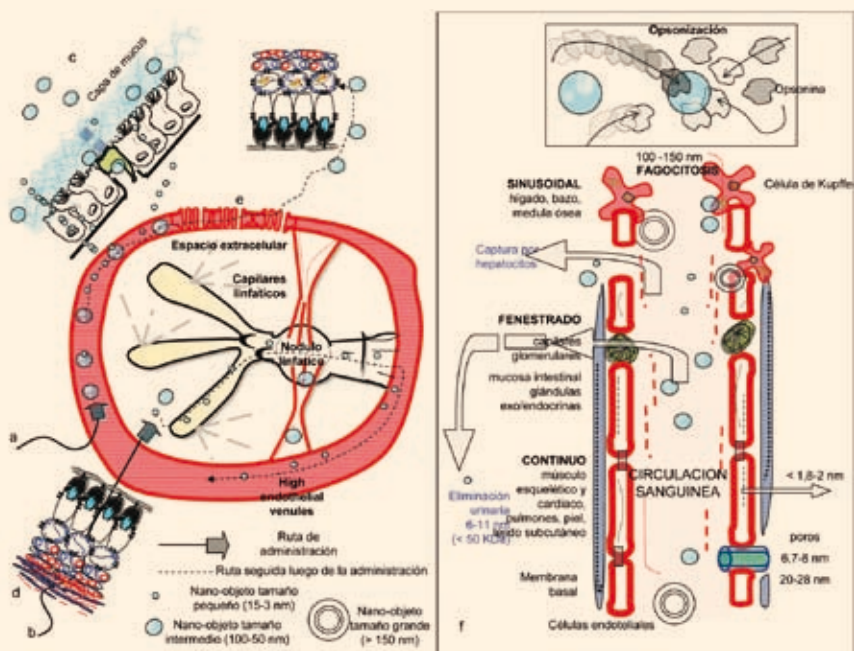
b) Ruta subcutánea (s.c), intramuscular (i.m) e intraperitoneal (i.p): los nano-objetos/nano-sed se inyectan en el espacio intersticial/extracelular. El sistema linfático elimina los excesos de fluidos y de material particulado del espacio intersticial. Únicamente pequeñas moléculas (< 16 kilo daltons, KDa) ingresan al compartimiento vascular a través de los poros de la pared de los capilares sanguíneos, en tanto que moléculas más pesadas únicamente son transportadas por el sistema linfático. Los nano-objetos pequeños (< 100 nm) ingresan a los capilares linfáticos y únicamente la pequeña proporción que no es capturada por los macrófagos de los nódulos linfáticos, drena a la circulación sistémica. Los nano-objetos de mayor tamaño permanecen en el espacio extracelular y aquellos hechos de matrices biodegradables actúan como reservorios de liberación sostenida de la droga transportada; cuando su tamaño desciende por debajo de los $7-8 \times 10^3$ nm por biodegradación, pueden ser capturados por fagocitosis.

c) Ruta oral : Los nano-objetos/nano-sed administrados por esta ruta están diseñados para proteger a la droga transportada de la acción de la acidez, lipasas, proteasas y sales biliares. Una vez en el intestino delgado, los nano-objetos idealmente deberían adherirse a la capa de mucus (mucoadhesión). Los nano-objetos/nano-sed mucoadhesivos pueden actuar como reservorios para la liberación de drogas, que a su vez ingresarían a los enterocitos. Usualmente los nano-objetos no son capturados por enterocitos, pero sí por las células M de las placas de Peyer; en este último caso, los nano-objetos son transcitados y entregados a la circulación linfática.

d) Ruta tópica: excluyendo los liposomas ultra-deformables y nano-objetos de diámetro menor a 5 nm, ningún otro nano-objeto, independientemente de su tamaño o forma, puede atravesar la seca superficie del estrato corneo (*stratum corneum*, sc). Esta barrera decrece considerablemente al perderse las capas celulares del sc.

e) La inflamación local está relacionada con incremento de permeabilidad de la vasculatura. En este caso, los nano-objetos en circulación sanguínea pueden extravasar para llegar a las células de la zona inflamada.

f) Nano-objetos en circulación sanguínea: el endotelio continuo contiene poros que permiten la extravasación de pequeñas moléculas (2-3 nm diámetro); el endotelio fenestrado de los riñones permite la eliminación urinaria de pequeños (< 5 nm) partículas deformables, dependiendo de su balance hidrofílico/hidrofóbico y carga eléctrica. La mayor parte de los nano-objetos poseen diámetros mayores a 5 nm y permanecen confinadas en circulación sanguínea, no pudiendo extravasar a tejidos periféricos. Mientras circulan en sangre, los nano-objetos son recubiertos por proteínas plasmáticas como la lipoproteína HDL, que se adsorbe a la superficie de liposomas causando la desestabilización de su bicapa y eventual pérdida de drogas hidrosolubles transportadas en su interior. La absorción de proteínas conocidas como opsoninas en la superficie de un nano-objeto promueve el reconocimiento y posterior eliminación de circulación sanguínea por parte de las células accesibles del sistema retículo endotelial. El grado de opsonización varía de acuerdo con la naturaleza de la superficie del nano-objeto, y con su tamaño. Los nano-objetos opsonizados son eliminados en órganos con vasculatura de endotelio fenestrado, fundamentalmente por parte de las células de Kupffer en la luz de los sinusoides hepáticos, seguido por los macrófagos de bazo y en menor extensión, dependiendo de su tamaño, por macrófagos pulmonares y de médula ósea. Los nano-objetos diseñados para evitar la opsonización son eliminados mas lentamente de circulación. En esta situación, los nano-objetos tienen mayores chances de extravasar a tejidos periféricos en sitios donde existe incremento de permeabilidad vascular —con destrucción local de membrana basal del endotelio continuo— causada por inflamación. (Modificado de *Drug delivery systems against leishmaniasis? Still an open question.* Eder L. Romero and María José Morilla. *Expert Opinion on Drug Delivery*. 5 (7): 805-823, 2008).



cho, varios tipos de nanomedicinas ya existen como productos aprobados por autoridades regulatorias y han ingresado al mercado farmacéutico mundial (figura 4).

En realidad, la estrategia de incorporar drogas a estructuras que funcionan como vehículos, con objeto de incrementar la selectividad de su entrega a sitios blanco, no es nueva. La idea data de 1977, cuando el grupo de Ward [2] incorporó antimoniales pentavalentes en liposomas (vesículas formadas por bicapas lipídicas que encierran un espacio acuoso interno, conformadas por lípidos anfipáticos, usualmente esteres de glicerol con ácidos grasos y ácido fosfórico, de simetría generalmente cilíndrica cuya cabeza polar se orienta hacia el medio acuoso y las colas lipídicas hacia el interior hidrofóbico de la bicapa (figura 5a, a1, a2, b) —notar diferencia con micelas, que son asociaciones de moléculas también anfipáticas pero de simetría cónica, que se hallan en equilibrio termodinámico con su entorno y que en medios acuosos orientan sus cabezas polares hacia el exterior acuoso y sus colas hacia el *core* hidrofóbico que no contiene agua (figura 5c,d)) para tratar leishmaniasis visceral—. Se halló que una vez incorporados en liposomas, farmacocinética y biodistribución de los antimoniales cambiaba rotundamente respecto de la droga libre. Esta observación incentivó

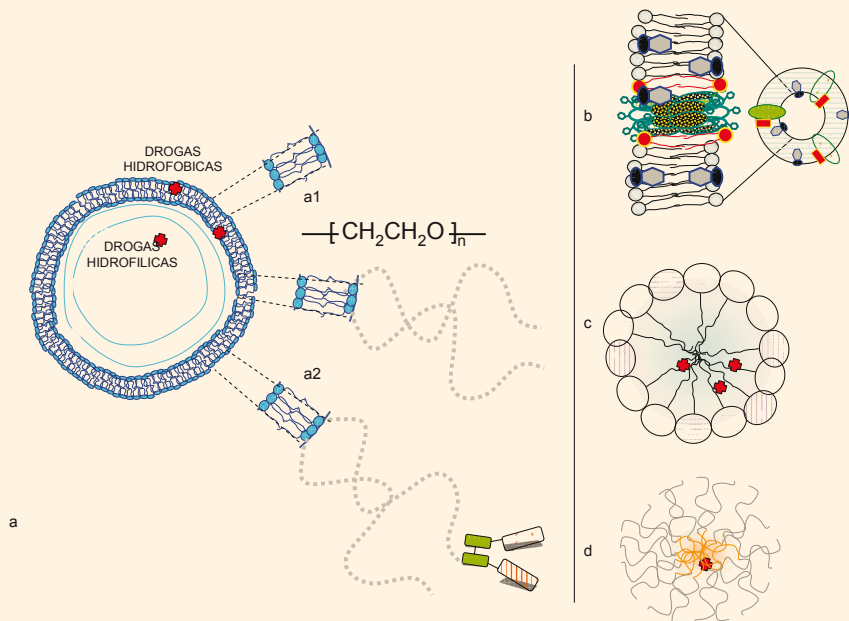
FIGURA 5. Nano-objetos tridimensionales más comunes usados como nano-*sed*

a) Nano-objeto tipo liposoma unilamelar, detalle de bicapa lipídica formada por fosfolípidos (moléculas anfipáticas). a1) Detalle de bicapa lipídica con protección estérica (5 % mol: mol polietilenglicol 2000, proporciona una cobertura de 50 Å; dibujo no a escala): direccionalización o *targeting* pasivo. a2) Detalle de bicapa lipídica con protección estérica unida a la fracción Fab de anticuerpo monoclonal: *targeting* activo.

b) Estructura de Ambisome®. Liposoma del tipo SUV (*small unilamellar vesicle*), que contiene HSPC (fosfatidilcolina de soja hidrogenada), fosfatidilglicerol, colesterol. Octámero de Anfotericina B transmembrana.

c) Micela convencional (formada por lisofosfolípidos, o surfactantes iónicos o no iónicos).

d) Micela polimérica (formada por asociación de copolímeros en bloque, como poloxámeros).



a muchos otros grupos de investigación, principalmente europeos, a abordar la preparación de liposomas de distinta estructura y tamaño, generalmente conteniendo drogas de bajo peso molecular poco hidrosolubles o muy tóxicas, con el objeto de modificar su farmacocinética y farmacodinamia y así conseguir mejorar los efectos terapéuticos de dichas drogas. Es sabido que para ejercer su acción en forma óptima, las drogas deben llegar en tiempo y forma al sitio blanco; la ausencia de selectividad y las concentraciones por debajo de las terapéuticas disminuyen su efectividad. Teóricamente, la entrega correcta de drogas debería superar los impedimentos interpuestos por barreras epiteliales, flujo turbulento, enzimas, pH, membranas celulares o de organoides. De acuerdo con la química medicinal, la factibilidad del cruce de estas barreras, dependería estrictamente de la estructura química de la droga. Pero ahora, la ambiciosa intención de la incorporación de drogas en liposomas era posibilitar el transporte de las mismas a través de barreras y conseguir su entrega selectiva, sin introducir modificaciones en su estructura. Los espectaculares cambios en *performance* terapéutica de los antimonioales liposomales respecto de los antimonioales libres permitieron el surgimiento de un nuevo paradigma: el que una vez incorporada a liposomas, farmacocinética y biodistribución de una droga deja de depender de su propia estructura, para depender del tamaño, carga neta, composición lipídica y estructura superficial del liposoma.

Es importante reconocer que los estudios preclínicos y clínicos de diferentes tipos de liposomas a los que se incorporaron drogas con fines terapéuticos al cabo de más de 20 años ha generado una sólida base de conocimientos que en la actualidad nos permite predecir, con cierta seguridad, la relación entre estructura y tamaño liposomal con la vía de administración, farmacocinética, biodistribución y hasta el tránsito intracelular de la droga entregada.

LOS LIPOSOMAS TAMBIÉN SON NANO-OBJETOS Y POR ENDE, LOS NANO-SED MÁS ANTIGUOS

Diez años atrás, los liposomas eran clasificados como suspensiones coloidales, haciendo referencia a partículas en suspensión con tamaños entre 1 y 1000 nm, al igual que las suspensiones de micelas y de proteínas, aerosoles y geles. Sin embargo, durante el mismo periodo, el número creciente de investigaciones emergentes de la gigantesca arena nanotecnológica llevó a muchos investigadores a deslindar relación entre liposomas y los hipervariados, multiestructurales “sistemas nanoparticulados” (nanopartículas poliméricas, metálicas, lipídicas o de óxidos metálicos, nanotubos y nanofibras, dendrímeros, nanocristales) que, en definitiva, no son otra cosa que nano-objetos. Desde principios del año 2000 hasta la fecha han surgido más de 5 mil artículos de investigación —a tasa exponencial— que emplean sistemas nanoparticulados para controlar la entrega de drogas. En muchos de ellos, lamentablemente, se ignoraron valiosos conceptos elementales obtenidos a lo largo de dos décadas de estudios sobre liposomas. Vale la pena mencionar que su administración endovenosa permitió revelar fenómenos universales, a repetirse toda vez que cualquier estructura particulada entra en contacto con proteínas y células de la sangre. Por ejemplo, las bases biofísicas de la opsonización, y la relación entre radio de la estructura, potencial Z, módulo de elasticidad, tensión superficial/ protección estérica y patrón y monto de adsorción de proteínas plasmáticas, con la farmacocinética y biodistribución del lipo-

soma, pueden extenderse a cualquier tipo de nanopartícula. La posibilidad de direccionamiento (*targeting*) pasivo, que permite la acumulación de liposomas protegidos estéricamente en las vecindades de sitios con aumento de permeabilidad vascular y disminución de drenaje linfático, también es factible para cualquier sistema nanoparticulado. Las incógnitas /dificultades estratégicas del *targeting* activo y del control del tráfico intracelular, por otro lado, permanecen vigentes no sólo para los liposomas, sino también —y era de esperarse— para cualquier sistema nanoparticulado.

Vemos entonces que por su tamaño, generalmente menor de 150 nm, porque su estructura puede ser manipulada en la nanoescala y por permitir controlar farmacocinética y biodistribución de drogas, los liposomas deberían ser considerados como los más estudiados del *tsunami* de nano-objetos aplicado a la entrega de drogas. Y, efectivamente, los liposomas han sido recientemente clasificados como nano-objetos de tipo nanoparticulado (con tres dimensiones en la nanoescala), junto con dendrímeros y *quantum dots*. Los nanotubos y nanofibras serían nano-objetos de tipo bastón, con dos dimensiones en la nanoescala. Lo único que separa a los liposomas de los nano-objetos recientemente descritos es su fructífero pasado y presente, algo conocido por parte de la tecnología farmacéutica convencional, pero desconocido para la mayoría de los científicos sumados a la ruta transversal de la nanotecnología y que abordan el empleo de nanopartículas como sistemas de entrega de drogas.

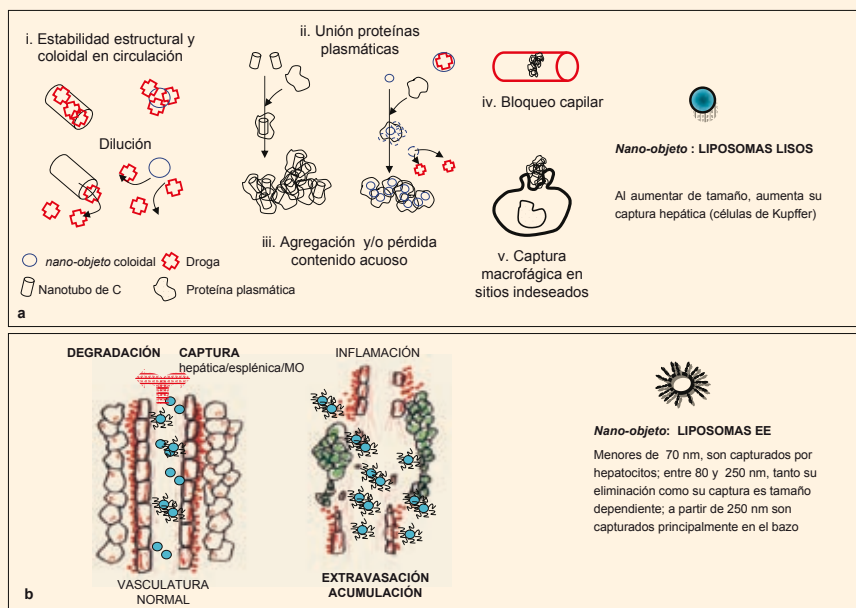
NANO-SED ADMINISTRADOS POR VÍA ENDOVENOSA:

La mayoría de los nano-objetos actualmente en el mercado se administran por vía endovenosa, las proteínas del plasma se asocian a la superficie de los nano-sed, lo que causa su destrucción, agregación y/o eliminación de la circulación. Esto reduce el tiempo de permanencia de los nano-sed en circulación y en consecuencia sus efectos terapéuticos (figura 6a). Cuando los nano-sed son liposomas, nanopartículas poliméricas o nanotubos de carbono, la asociación con las proteínas plasmáticas puede evitarse recubriéndolos con una sustancia llamada polietilén glicol. Esta protección se conoce como *estabilización estérica* (EE), y permite que un nano-sed de hasta 200 nm de tamaño permanezca en circulación por largo tiempo, independientemente de su concentración, estructura y de la carga eléctrica de su superficie. La prolongación del tiempo de circulación aumenta las oportunidades de que los nano-sed abandonen la circulación en sitios donde la permeabilidad de los vasos sanguíneos está alterada y es mayor que la normal. En estas condiciones dan con sitios que unen alta permeabilidad vascular a un escaso drenaje linfático y a una elevada presión intersticial, como sucede en los tumores sólidos o en zonas inflamadas. La acumulación según este mecanismo se conoce como direccionamiento (*targeting*) pasivo (figura 6 b).

EJEMPLOS DE NANO-SED CON CAPACES DE ATRAVESAR BARRERAS ANATÓMICAS: DENDRÍMEROS Y LIPOSOMAS ULTRADEFORMABLES

Los dendrímeros (D) son nano-objetos poliméricos de entre 2 y 10 nm de tamaño, con ramificaciones en número y posición estrictamente controladas. Ni los más pequeños ni los mayores son aptos para incorporar drogas en su interior y actuar como nano-sed. En cambio, los de tamaño intermedio tienen una estructura semirrígida, que los hace capaces de retener drogas (figura 7a) y les confiere extremo interés farmacéuti-

FIGURA 6. Estabilidad estructural de nano-objetos usados como *nano-sed*, en circulación sanguínea



co. Los D pueden atravesar las paredes que tapizan los vasos sanguíneos cuando éstas están intactas. También acceden libremente al citoplasma. Para esto, los que tienen carga positiva se adsorben sobre la membrana celular formando hoyos transitorios a través de los cuales penetran al citoplasma mientras que los otros son captados por pinocitosis y luego de ingresar a las células llegan al citoplasma porque provocan la ruptura de la membrana que los envuelve.

Por otro lado, el estrato córneo formado por restos de células que cubre la superficie de la piel es la principal barrera para el acceso a las capas más profundas de la epidermis. Ésta es la causa del fracaso de muchos tratamientos basados en el depósito del medicamento. En algunos casos sucede lo opuesto y las sustancias atraviesan la piel e ingresan en la circulación sistémica. Cuando esto sucede, la aplicación tópica de sustancias puede producir efectos colaterales dañinos. Los liposomas ultra-deformables —liposomas UD— (figura 7 c), impulsados por gradientes de humedad, son capaces de atravesar canales en la membrana cuyo diámetro es varias veces menor al que tendrían estos *nano-sed* si no pudiesen cambiar fácilmente de forma. Este tipo de *nano-sed* permite superar la barrera que interpone un estrato córneo intacto.

LA PRINCIPAL PLATAFORMA NANOMÉDICA ES LA DE LOS *NANO-SED*

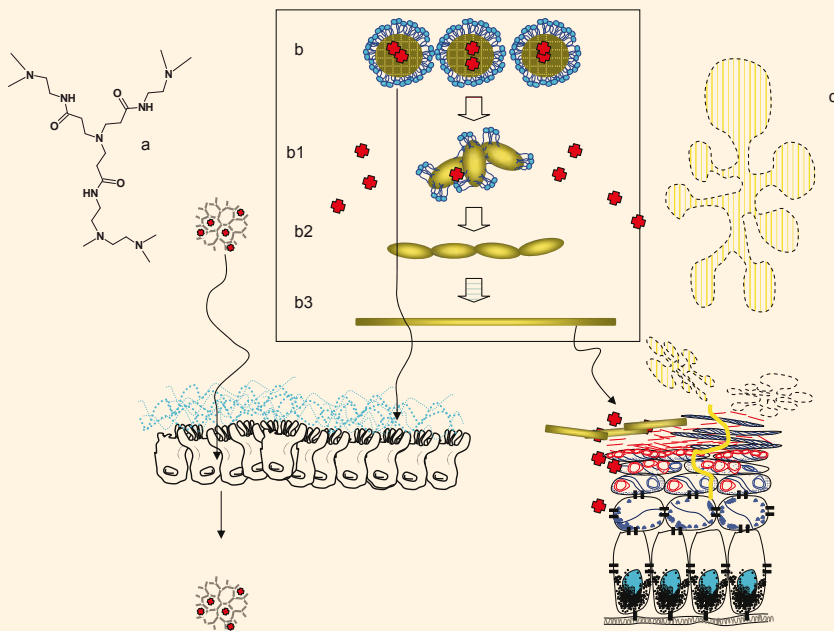
El principal campo de conocimiento de la nanomedicina es el de diseño de *nano-sed*, abarcando el 76 % de artículos publicados en el mundo académico, seguido por el 11 % para diagnóstico *in vitro*, 6 % para biomateriales y 4 % para sistemas de imágenes. Cerca de un 60 % de las patentes mundiales en nanomedicina también corres-

FIGURA 7.

a) Dendrimeros: nano-objetos poliméricos de distribución de tamaño monodispersa con elevada relación área/volumen y diámetro entre 2-8 nm. Los dendrimeros de poliamidoamina (PAMAM) de generaciones (G) 2.5 a G 3.5 pueden incrementar el pasaje para celular a través de la mucosa gastrointestinal, al secuestrar el Ca^{+2} de modo de inducir la apertura de las uniones estrechas. El mecanismo de complejación sería equivalente al ocurrido con nano-partículas del polímero quitosán. Los dendrimeros PAMAM son hidrosolubles y actúan como micelas unimoleculares para formar complejos con drogas hidrofóbicas incorporadas a sus bolsillos hidrofóbicos internos. Su elevada estabilidad estructural permite su administración por la vía oral. A diferencia de otros tipos de partículas poliméricas, los dendrimeros no presentan problemas de escalado, presencia de productos de contaminación y heterogeneidad de tamaño.

b) Nanopartículas lipídicas sólidas y nanopartículas lipídicas nano estructuradas (LSN y NLN): nano-objetos de core hidrofóbico de cristalinidad variable, estabilizado por una superficie anfipática. Las drogas son retenidas en el interior del core cristalino. c1) frente a un estímulo como luz, deshidratación, calor, el core transiciona espontáneamente a una mayor cristalinidad, liberando la droga; el surfactante se pierde. c2) y c3) las nanopartículas forman un gel oclusivo, que impide la pérdida de humedad una vez aplicado sobre la piel. LSN y NLN pueden administrarse por vía tópica y oral.

c) Liposomas ultra deformables (LUD): nano-objetos vesiculares capaces de experimentar locomoción espontánea y penetración a través de capas profundas por el interior de nano canales acuosos del estrato córneo (sc). LUD no se fusionan ni coalescen sobre la superficie del sc y penetran sin ser destruidos. UDL pueden transportar eficientemente drogas hidrofílicas de bajo o alto peso molecular a través de lesiones superficiales engrosadas, que representan una barrera adicional a la absorción por vía tópica.



ponden al campo del *drug delivery* (<http://scientific.thomson.com/products/sci>). La industria farmacéutica muestra especial interés en las nanosuspensiones, que permiten incrementar la solubilidad de pequeñas moléculas terapéuticas (alrededor del 40 % de las moléculas en el *pipeline* pertenecen a esta clase), permitiendo su administración por vía oral para producir elevada biodisponibilidad. Existen ya cinco productos en el mercado, producidos por Elan Drug Delivery (una compañía con sede en Dublín, Irlanda), en alianza con Merck & Co, ParPharmaceutical Companies, Wyeth Pharmaceuticals, Abbot, y SkyePharma. [3,4].

LOS PAÍSES DESARROLLADOS SE ESTÁN ORGANIZANDO PARA ABORDAR LOS DESAFÍOS METODOLÓGICOS Y CONCEPTUALES RELATIVOS AL DISEÑO DE NANO-SED

Tratamientos más veloces, más eficaces y menos tóxicos, son las ventajas derivadas de la aplicación de la nanomedicina a los nichos terapéuticos que causan mayor carga social y sufrimiento del paciente. Esto se traduce en ganancias económicas proyectadas a nivel global, en el orden de los billones de euros para la próxima década, únicamente en referencia a nano-sed. La European Commission ha emitido una serie de documentos, resumidos en el denominado “Bases para una agenda estratégica de investigación” (SRA en nanomedicina), lanzada a fines de 2006. En esta propuesta, han participado tanto empresarios como investigadores de todos los países de la Comunidad Económica Europea. Los documentos fueron dos; el primero fue un *vision paper* – “Bases para una agenda estratégica de investigación en nanomedicina”, emitido en septiembre de 2005 y abarcando hasta el año 2020. Poco más tarde, en noviembre de 2006, se amplió la participación a unas 150 organizaciones miembro de toda Europa y se emitió la “Agenda estratégica de investigación en nanomedicina de la Plataforma Tecnológica Europea” (5). Existe, además, un tercer documento, el *Forward Look report* emitido por la European Science Foundation (ESF, www.esf.org)³ – en conjunto con el European Medical Research Council (EMRC). En Estados Unidos, bajo la coordinación de varias agencias gubernamentales —entre ellas la Nacional Science Foundation (NSF)— bajo el Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET) (un subcomité del National Science and Technology Council (NSTC)), se creó, en 2001, la National Nanotechnology Initiative (NNI). La NNI organiza desde las agencias que la conforman, una estrategia de financiamiento en cinco modalidades: 1) inversión en investigación fundamental en ciencia e ingenierías; 2) financiación de investigaciones puntuales, bajo la denominación de “grandes retos” en: materiales nanoestructurados, manufactura en la nanoescala, instrumentos en la nanoescala y metrología, detección y protección de material químico-biológico-radiológico-explosivo; nanoelectrónicos, nanofotónicos, nanomagnéticos, aplicaciones médicas, robóticas y mejoramiento medioambiental; 3) apoyo para el desarrollo de centros de investigación (ubicados en laboratorios nacionales); 4) fondos para emplazamiento de infraestructura estratégica de I+D en nanotecnología y, 5) investigaciones de aspectos sociales y programas de educación [6].

Estados Unidos plantea un ambicioso esquema de investigación, fuertemente sostenido por empresas, basado en una fase inicial de investigación básica, y no definen profundización alguna sobre nano-sed. Claramente, Estados Unidos y Europa enfocan el desarrollo en nanomedicina en forma completamente diferente. Europa no se centra en la creación de nuevos centros de investigación de excelencia, sino que identifica una serie de problemas clave de la salud basándose en parámetros como tasa de mortalidad, nivel de sufrimiento que la enfermedad impone al paciente, prevalencia e impacto que la nanomedicina puede tener en el diagnóstico temprano para evitar la enfermedad. De acuerdo con la SRA, la investigación nanomédica debe iniciarse y estimularse en aquellas áreas de la salud donde el beneficio para el

³ U.S. National Institute of Health (Roadmap for Medical Research in Nanomedicine) 2006.

paciente es máximo, y enfocarse en enfermedades de máximo impacto socio económico. Siguiendo los lineamientos del reporte de WHO sobre "Priority medicines for Europe and the World" de noviembre de 2004, las enfermedades identificadas como prioritarias y que producen la mayor carga social son las cardiovasculares (principal causa de muerte en Europa, siendo infarto de miocardio y *stroke* la mitad de las muertes en Europa); cáncer (segunda causa de muerte en el mundo occidental). Debido al envejecimiento progresivo de la población, y a mejoras en las terapias cardiovasculares, se visualiza al cáncer como la principal causa de muerte en las décadas futuras. Se incluyen las enfermedades músculo esqueléticas e inflamatorias como la artritis reumatoide, porque tienen un efecto devastador en la calidad de vida y requieren constante medicación. Enfermedades como las neurodegenerativas (Alzheimer o Parkinson) también están relacionadas con la edad, y reducen la calidad de vida además de conllevar una enorme carga social. La diabetes es otro ejemplo de enfermedad que requiere constante medicación y monitoreo y cuya incidencia se espera que aumente. En último lugar se identifican las infecciones globales tanto virales como bacterianas que no tienen tratamiento adecuado. También son considerados de relevancia la emergencia de resistencia en infecciosas y de enfermedades como HIV/AIDS y SARS.

Con base en potencialidades conocidas y expectativas de grado de avance, y en términos de aceptación por autoridades de salud y entrada en pruebas clínicas, la SRA ha seleccionado tecnologías clave cuyo desarrollo debería estimularse. Así, se comenzó por identificar nanobjetos de tipo estratégico: micelas, liposomas, dendrímeros, cristales líquidos, nanopartículas (nanoesferas-nanocápsulas amorfas o cristalinas), hidrogeles, polímeros para impresión molecular, conjugados poliméricos, implantes formados *in situ*, para rutas de administración peroral fundamentalmente, y en posterior término parenteral, transdermal, trans tejido/local implante. Los nano-objetos de máxima relevancia serían aquellos que permitieran controlar no sólo la farmacocinética sino también la entrega selectiva de cantidades masivas de droga, especialmente de drogas muy activas. Se establecieron como prioritarios los *nanosed* basados en nano-objetos preparados en base a materiales biodegradables, biocompatibles, no tóxicos y nano-objetos de estructura y arquitectura controlada, tales como polímeros biomiméticos, dendrímeros terapéuticos y nanotubos. Se establecieron como prioritarias las tecnologías de autoensamblaje y aquellas responsables de generar nano-objetos con nuevas funciones: direccionamiento activo, entrega por comando, nanoaparatos para entrega inteligente/sistemas gatillados por estímulos biológicos, sistemas de entrega autorregulados y nuevos nano-objetos poliméricos para la entrega de péptidos/proteínas terapéuticas, así como sistemas que permitan el control de tráfico intracelular. Se enfatizó la necesidad de contar con esquemas universales de formulación, que pudieran emplearse para envío iv, im, o peroral. La escala temporal propuesta por Europa va desde 2005 hasta 2020, dejando para los últimos cinco años la aplicación de nano-objetos nanoparticulados a ingeniería de tejidos, los sistemas de direccionamiento de genes y a células, la teranóstica (diagnóstico + terapia) empleando nano-objetos, y los nano-objetos + microchips multirreservorios, en ese orden.

A diferencia de su ambicioso equivalente incluido en la Nacional Nanotechnology Initiative (NNI) de los Estados Unidos, la Agenda Estratégica propuesta por la EC sería un buen modelo a seguir por nuestros países latinoamericanos, porque se basa en una mirada local hacia problemas propios, que ofrece soluciones potenciales en un plazo de tiempo no mayor a diez años.

¿POR QUÉ LA IRUPCIÓN DE LAS EMPRESAS BIOTECNOLÓGICAS EN FARMACIA NECESITA DE LA NANOTECNOLOGÍA?

La química medicinal y la química combinatoria buscan nuevos *targets* para fabricar drogas “a medida”. Este enfoque, sin embargo, únicamente es válido para moléculas de bajo peso molecular, y para el *screening* de macromoléculas de origen natural como proteínas, ácidos nucleicos con actividad biológica propia. Considerando que entre 2002 y 2003 la Food and Drug Administration (FDA) aprobó tantos productos biotecnológicos (como anticuerpos monoclonales, hormonas, enzimas y ácidos nucleicos) y sistemas de *entrega*, como nuevas moléculas de bajo peso molecular, el reporte 2006 PhRMA “Biotechnology medicines in development” identifica 418 nuevas medicinas biotecnológicas para más de 100 enfermedades, incluyendo cáncer, infecciosas, autoinmunes, AIDS/HIV y condiciones relacionadas, actualmente en pruebas clínicas o bajo revisión de la FDA. Sin embargo, el potencial terapéutico de estas macromoléculas, así como su aplicación clínica, está impedido por las numerosas barreras anatómicas y fenomenológicas interpuestas a su entrega.

Por ejemplo, tanto durante manufactura, almacenamiento y tránsito *in vivo*, es de extrema importancia mantener las estructuras secundarias, terciarias y cuaternarias de las proteínas. Las mismas están mediadas por interacciones débiles y son fácilmente destruidas por variaciones de pH, fuerza iónica, temperatura, alta presión, solventes no acuosos, iones metálicos, detergentes, adsorción superficial, agitación y fuerzas de fricción. La mayoría de estos factores está presente en procesos de manufactura, incluyendo esterilización y liofilización. La desestabilización de las proteínas reduce su actividad biológica, incrementa su inmunogenicidad y puede conducir a su agregación. Su estructura vulnerable a enzimas proteolíticas es responsable de su corta vida media en el sitio de administración. Su gran tamaño impide que se difundan a través de barreras epiteliales, a menos que existan transportadores específicos. La vía de administración más común para proteínas es la iv, que usualmente no es bien tolerada por los pacientes. Aunque el *clearance* de las proteínas inyectadas iv puede ir desde los pocos minutos hasta los varios días, la mayoría de las proteínas también tienen cortas vidas medias en circulación. Además, puede ocurrir distribución indeseada y por ende requerirse dosis mayores y más frecuentes para conseguir eficacia terapéutica, que en su conjunto puede causar efectos tóxicos. Las vías sc e im también se usan para administrar biofarmacéuticos. Luego de la administración sc, la biodisponibilidad puede ser tanto 100 % como mucho menor, dependiendo del peso molecular, sitio de inyección, actividad muscular y condiciones patológicas. Proteínas por debajo de 16.000 Da son directamente absorbidas vía capilares sanguíneos locales, en tanto aquellas más pesadas pueden difundir a través de la pared endotelial sanguínea para entrar a los capilares sanguíneos en los sitios de inyección, o pueden ingresar al sistema linfático para volcarse a la sangre desde el conducto torácico. El transporte linfático es un proceso lento y la permanencia prolongada de proteínas en el sitio de inyección las expone a degradación enzimática. Por estas razones, la efectividad de proteínas o péptidos terapéuticos dependerá de un régimen de administración frecuente, que es incómodo para el paciente, a la vez que costoso. Por ello, la posibilidad de emplear vías no parenterales, como la tópica o mucosa, para la entrega de proteínas terapéuticas, es de extremo interés para la industria farmacéutica. Por ejemplo, la penetración de nano-objetos a través del estrato córneo, permitiría entre-

gar macromoléculas a capas profundas de la epidermis o superficiales de la dermis, sin llegar a la sangre, o sin afectar a aquellos estratos celulares que mantienen la viabilidad de la piel. La posibilidad de emplear nano-objetos muco adhesivos y con capacidad de protección estructural frente al entorno hostil del tracto gastrointestinal, permitiría la entrega de proteínas por vía oral, que serían capturadas por las células M de las Placas de Peyer o por enterocitos. De esta forma, aun en pequeñas cantidades llegarían intactas al sistema linfático o a la sangre, respectivamente; estas estrategias son particularmente prometedoras para macromoléculas de muy alta actividad específica. Abordajes similares servirían para el cruce de las barreras mucosas respiratorias y urogenitales.

Finalmente, a menos que se cuente con un sistema adecuado de entrega, el movimiento de macromoléculas por simple difusión por el interior celular es prácticamente imposible. Las macromoléculas deben transitar en el interior de vesículas endo o fagocíticas, que las direccionarían sobre los organoides blanco. La captura celular de nano-objetos que contengan proteínas incorporadas a su estructura permite que las proteínas ingresen a diferentes rutas de tráfico vesicular. Ejemplo de ello, en las terapias de remplazo enzimático, donde el organoide blanco que necesita incorporar enzimas faltantes a su interior son los lisosomas o las mitocondrias, o el núcleo en caso de terapia génica con plásmidos.

LA NANOMEDICINA DEBE SER TRASLACIONAL

Respondiendo a las necesidades globales de colaboración y cooperación, la Sociedad Internacional de Nanomedicina (International Society for Nanomedicine, ISNM) se presentará en el seno de la 2da Conferencia CLINAM (www.clinam.org) el día 26 de abril de 2009. La ISNM ya cuenta con estatutos, lineamientos iniciales y estrategia de acciones a corto plazo, vertidos por sus dos principales socios fundadores, la European Society for Nanomedicine y la American Society for Nanomedicine (ASNM) y será la principal referente de las capacidades académicas, empresariales y de organizaciones políticas a escala mundial para conseguir la llegada a la clínica de las estrategias terapéuticas y de diagnóstico nanomédicas. Representantes de todos los continentes harán una presentación de cinco minutos exhibiendo sus programas nacionales en nanomedicina. De cara a esta realidad, debemos ser conscientes que llegado el año 2009 nuestros países latinoamericanos ni siquiera cuentan con plataformas nanomédicas que mostrar, dado que la masa crítica de investigadores y emprendedores abocados a desarrollar este tipo de estrategias todavía está por reunirse. El futuro ya fue ampliamente discutido en el primer mundo; hemos tenido la oportunidad de escuchar los argumentos en juego y deberíamos comenzar a hacer lo propio desde nuestro lugar en el sur.

REFERENCIAS

- [1] (www.fda.gov/nanotechnology/faqs.html)
- [2] Black C D, Watson G J and R J Ward. 1977. "The use of Pentostam liposomes in the chemotherapy of experimental leishmaniasis". *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 71, 550-552.
- [3] Volver Wagner, Anwyn Dullaart, Anne- Katrin Bock y Axel Zweck. 2006. "The emerging nanomedicine landscape". *Nature Biotechnology*, vol. 24, 10 1211-1217

- [4] Nanomedicine: developing nanotechnology for applications in medicine. Gang Bao. (T Jarm, P Kramar , A Županiè (eds.) : *Medicon 2007, IFMBE Proceedings* |6, pp. 1135-1136, 2007. www.springerlink.com (c) Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] <http://cordis.europa.eu/nanotechnology/nanomedicine.htm>).
- [6] Delgado Ramos, Gian Carlo. 2008. "Entre la competencia y la dependencia tecnológica: la nanotecnología en el continente americano". *Nomadas: Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas*. 17(1). Publicación Electrónica de la Universidad Complutense. ISSN 1578-6730 www-giandelgado.blogspot.com.

DOCUMENTOS:

World Health Statistics 2008. Part 1. Ten highlights in health statistics.
WHO World Health Report 2003.
(www.clinam.org)

Ética para nanomedicina: primera propuesta para la elaboración de un código

TESSY MA. LÓPEZ GOERNE* Y ANTONIO PAOLI BOLIO**

RESUMEN. Éste es el primer documento base para iniciar un diálogo en torno a la formulación de un código de ética relativo a las prácticas de la nanomedicina. Presentamos aquí una introducción y trece capítulos, con el fin de poner estos avances a la consideración de diversos especialistas que quieran dar sus puntos de vista, a fin de ampliar, precisar y fundamentar sistemáticamente estas recomendaciones normativas.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología se ha convertido en una de las ciencias clave del siglo XXI. La inmensa inversión de los gobiernos más poderosos del mundo, y de otros muchos gobiernos, así como de empresas privadas, universidades y centros de investigación, parece mostrar la gran importancia que se le otorga. Su aplicación a los problemas de salud es un campo emergente llamado nanomedicina.

La nanomedicina empieza a posicionarse como una de las grandes ramas de la nanotecnología, relacionada con muchas disciplinas: química, física, biología molecular, computación, medicina, genética, electrónica, todas las ingenierías y otras muchas más.

A nivel global, ahora se define “el mundo nano” como la investigación y el desarrollo en escalas de miniaturización, que van desde 1 hasta 100 nanómetros (nm), y un nm equivale a una millonésima parte de un milímetro. Hay científicos cuya opinión es que debiera aumentarse el intervalo del tamaño de partícula del “mundo nano”, a fin de incluir diversas partículas y eventos importantes que acontecen a varios cientos de nm y que quedan excluidos de esta nueva ciencia.

En esta escala nano se crean estructuras, dispositivos y sistemas con propiedades funcionales novedosas; los científicos pueden manipular átomos y moléculas, así como enlaces, polaridad, energía y densidad electrónica entre otras características. Con esta manipulación se crean materiales nunca vistos, con cualidades fisicoquímicas peculiares y sumamente ventajosas: por ejemplo, más fuertes, más ligeros, más adecuados para su manejo y que cumplen mucho mejor las funciones para las que fueron desarrollados.

En los últimos 6 años se han creado institutos de investigación alrededor del mundo, colegios de expertos, grupos de análisis, asociaciones de industriales, posgrados universitarios, cuadros políticos que se plantean estrategias económicas, políticas y sociales para impulsar y aprovechar este nuevo boom de la ciencia. En la gran mayoría de los países ya se han establecido núcleos de investigación nanotecnológica y en muchos de ellos de investigación en nanomedicina.

* Laboratorio de Nanomedicina Catalítica, UAM-Xochimilco.

** Departamento de Educación y Comunicación de la UAM-X.

La eficiencia en el suministro de medicamentos nanoestructurados podrá reducir y hasta eliminar efectos secundarios negativos. Se buscará que la a nanomedicina estimule los mecanismos endógenos de autocuración. Éstas son algunas de las prometedoras perspectivas de la nanomedicina, que podría en el futuro desarrollar acciones reparadoras a nivel celular y molecular.

Una mejor comprensión del funcionamiento del cuerpo humano a nivel nanométrico ha dado como resultado soluciones muy importantes hasta el momento. Hoy, ya es viable la creación de nuevos instrumentos médicos de diagnóstico e imagen que hacen posible detectar focos enfermos que antes era imposible ver. De esta manera, el diagnóstico se facilita y la terapia podrá ser más acertada.

Sin embargo, pese a éstos y otros grandes avances, hay nuevos retos para la salud difíciles de superar: el aumento del promedio de vida, la disminución de la tasa de natalidad, la vida cada vez más sedentaria en los países desarrollados, el incremento de contaminantes en el medio ambiente, el acrecentamiento del precio de los nuevos medicamentos y servicios médicos privados, la disminución de los seguros de servicios médicos, aunado al crecimiento de los índices de pobreza en el mundo y otros factores nocivos más presentan desafíos difíciles de superar. De tal manera, tanto los grandes avances de la biotecnología y de la nanomedicina como las transformaciones de la composición social, nos ubican frente a una nueva realidad en relación con el tratamiento de las enfermedades y la higiene del ser humano y su entorno.

La nanomedicina es alta tecnología emergente con un importante potencial económico e industrial que podría contribuir al bienestar personal y social si se mantienen buenos estándares de seguridad y puede llegar a toda las clases sociales.

Es probable que para el año 2015, alrededor de la mitad de los productos de línea en la industria farmacéutica sean nanoestructurados.

Nuevas políticas y reglamentos tendrán que generarse, tendrán que cambiar los papeles que hoy juegan médicos, enfermeras, dentistas, técnicos, pacientes, administradores de la salud. También tendrá que orientarse de nuevas maneras la educación para la salud a nivel de la escuela, la familia y los medios de comunicación.

Se presentará muy pronto la necesidad de ofrecer nuevas capacitaciones para científicos, médicos y todo tipo de terapeutas; los pacientes y el público en general se verán en la necesidad de aprender nuevas técnicas, métodos inéditos, y comprometerse para ello con sistemas de educación a distancia y con las implicaciones éticas que el uso de nanomateriales supone, lo cual buscamos mostrar a lo largo de este código.

Aunque la nanotecnología está en sus principios, sus avances ofrecen grandes esperanzas. En el mercado ya existen diversos productos nano que han mostrado un gran potencial para solucionar muchos problemas en estos campos. Las nuevas condiciones que ofrece la nanomedicina apuntan a formas inéditas de relación entre los médicos y pacientes; también orientan hacia formas inéditas de concebir la ética y las prácticas de la medicina. En este código, nos aproximaremos a algunas de estas prácticas.

Ante tal situación, es de suma importancia desarrollar un código de ética que tienda a normar el desempeño y la generación de políticas para el uso, investigación, fomento de la creatividad científica, comunicación entre los investigadores del campo, en relación con el conocimiento del cuerpo humano, la prevención de enfermedades, así como su diagnóstico, terapia, cuidado, monitoreo y fortalecimiento del ser humano. Es importante definir pautas que favorezcan la protección, cooperación, inversión, docencia, educación y participación social edificante.

Los capítulos del documento que ahora proponemos para crear tal código son:

- Capítulo 1. Sobre principios generales.
- Capítulo 2. Sobre la comunidad científica y la nanomedicina.
- Capítulo 3. Sobre las relaciones médico paciente y el uso de la nanomedicina.
- Capítulo 4. Sobre el diagnóstico nanotecnológico.
- Capítulo 5. Sobre la nanomedicina preventiva.
- Capítulo 6. Sobre la terapia nanomédica.
- Capítulo 7. Sobre la experimentación en seres humanos y las comisiones de bio-ética.
- Capítulo 8. Sobre el evitar en lo posible la toxicidad.
- Capítulo 9. Nanomedicina protectora del medio ambiente.
- Capítulo 10. Sobre la promoción de nuevas políticas públicas referidas a la nanomedicina.
- Capítulo 11. Sobre educación para el desarrollo de la nanomedicina.
- Capítulo 12. Sobre los negocios relacionados con la nanomedicina.
- Capítulo 13. Sobre la revisión permanente de este código de ética de la nanomedicina.

Los principios y las normas aquí presentados no sólo reglamentan, sino buscan estimular y propiciar el desarrollo de juicios éticos fundamentados nobles y edificantes.

CAPÍTULO 1. SOBRE PRINCIPIOS GENERALES

Artículo 1.1: Los principios y normas que en este código se presentan constituyen lineamientos normativos y principios para inspirar y guiar la conducta de las personas que investigan, elaboran o aplican nanotecnologías para conocer mejor las patologías y fortalezas del cuerpo humano, prevenirlo de posibles problemas de salud, diagnosticar, realizar terapias, cuidar, monitorear sus procesos y fortalecerlo mediante el uso de nuevos sistemas que aplican las propiedades físicas, químicas y biológicas que operan a nivel de la nanoescala. La nanoescala se refiere a materiales que miden entre uno y 100 nanómetros (nm); y esta unidad de medida equivale a una millonésima parte de un milímetro.

Artículo 1.2: La nanomedicina es la ciencia que trabaja en pro de la buena salud a nivel de la nano escala. Puede incluirse en ella la proyección, diseño, síntesis, invención de aparatos y nanocompuestos capaces de combatir enfermedades diversas, dispositivos para la dosificación o liberación controlada de fármacos, la caracterización molecular de diversos metabolismos celulares que contribuyan a enriquecer los sistemas de salud y nutrición humana, la aplicación de materiales y sistemas nanoestructurados para la comprensión, prevención, diagnóstico, terapia, cuidado, monitoreo, fortalecimiento y vitalización del ser humano.

Artículo 1.3: Se requiere de un lenguaje común que sea usado por los grupos multidisciplinarios, interdisciplinarios y transdisciplinarios para facilitar la integración de la nanomedicina como ciencia. Como punto de partida para lograr este lenguaje cuyos significados se compartan por la comunidad científica, y tiendan a extenderse a la población en general, se adopta el vocabulario que aparece en las páginas 1 a 7, del

documento PAS 131:2007, presentado por British Standards con título: "Terminology for medical health and personal care applications of nanotechnology".

Artículo 1.4: La normatividad supone un conjunto de valores que fundamentan principios y preceptos que invitan al buen actuar, al acto justo y noble del profesional dedicado a la nanomedicina para que promueva no solamente el control y el fortalecimiento de la salud física y mental, sino también para que auspicie el aumento de la energía, la fortaleza, la nutrición, vitalidad, inmunidad, lozanía, salubridad e higiene del ser humano y sus sociedades.

Artículo 1.5: Partimos de que la obligación de cuidar de la salud y de la vitalidad del ser humano y su sociedad, no se centra únicamente en los médicos y los sistemas sociales que la promueven, son responsabilidad de cada ser humano. Cada individuo debiera saberse con el compromiso de procurarse y procurar armonía y bienestar a sí mismo y al entorno.

Esto supone un auto constituirse, una autonomía personal y social responsable, así como un sistema permanente de colaboración con el medio ambiente.

Artículo 1.6: Las instituciones públicas y privadas de salud deberán brindar información didácticamente presentada para propiciar que la sociedad esté bien informada sobre los problemas de salud, básicos y de manera general, para auspiciar diálogos permanentes entre cada médico y sus pacientes, a fin de que los pacientes y sus familias entiendan mejor los mecanismos que promueven la salud individual y colectiva, pero también con el objeto de que los médicos comprendan los sentidos y tendencias de las iniciativas individuales y colectivas en torno a la salud.

La nanomedicina ha empezado a facilitar diversas formas confiables de pruebas que pueden realizarse en casa, estas pruebas cada vez serán más seguras y estarán más al alcance del público en general. En esta situación, los médicos deberán contar frecuentemente con que sus pacientes poseen mucha información sobre sus padecimientos. Además, hoy ya hay disponible, especialmente a través de internet, una gran cantidad de explicaciones, avisos y consejos para el tratamiento de cada padecimiento conocido. Estos saberes se deberán ofrecer gratuitamente con el fin de ilustrar al paciente, y a las personas que lo rodean, sobre sus enfermedades y sobre formas que ayudan a aliviarlos.

Artículo 1.7: El médico deberá asumir la responsabilidad de dialogar con su paciente y poner a su alcance todo aquello que esté en su saber y sus habilidades profesionales, explicarle qué es y cuáles son las implicaciones de un tratamiento novedoso derivado de la nanotecnología; pero nunca deberá asumirse como si fuera dueño de los destinos del enfermo, o infringir los derechos fundamentales de éste. Todo paciente de una institución médica puede asumir un papel activo en relación con los modos mediante los cuales se atienden sus problemas de salud. Los médicos tienen el deber de informar a los pacientes, o a sus representantes, sobre sus enfermedades y solicitarles su consentimiento para iniciar cualquier tratamiento.

Artículo 1.8: Es importante que las pruebas de laboratorio y las prácticas de la nueva nanomedicina se aproximen cada vez más, por lo que se recomienda a los hospitales, especialmente a los de tercer nivel, contar con laboratorios de experimentación y desarrollo de nanomateriales, a fin de que se observen procesos, se demuestren funcionamiento, se preparen materiales. Es de gran trascendencia que los nosocomios cuenten con un núcleo cercano en el que se presenten modelos de simulación, se verifique el funcionamiento de nuevas tecnologías; operaciones recurrentes que guíen

a nuevos resultados, a métodos inéditos que busquen la comprensión de nuevos mecanismos de prevención, diagnóstico, terapia, cuidado, monitoreo, fortalecimiento y vitalización del ser humano.

Artículo 1.9: El investigador que dirige un centro o laboratorio de nanomateriales o nano dispositivos para uso médico debe contar con bagaje teórico y experiencia en su campo, con resultados juzgados por comités especializados en el tema, presentados en reuniones de expertos y publicados en revistas reconocidas por autoridades científicas del campo, a fin de que sirvan como referencias sólidas para dialogar y construir nuevos horizontes. Es importante que los laboratorios cuenten con proyectos generales, así como con protocolos sistemáticos de investigaciones puntuales orientadas hacia fines específicos.

Los investigadores tiene el deber de hacer la mejor ciencia posible, de realizar su trabajo con consistencia, de comunicar sus resultados de manera responsable, de generar innovaciones lo más seguras y fiables según el mejor conocimiento disponible.

CAPÍTULO 2. SOBRE LA COMUNIDAD CIENTÍFICA Y LA NANOMEDICINA

Artículo 2.1: El científico que elabora nanopartículas con el fin de que sean usadas en procesos de prevención, diagnóstico, terapia o de fortalecimiento de los seres humanos, debe hacer explícitos sus métodos y procesos de investigación, sus hipótesis y sistemas de verificación, de tal manera que puedan ser discutidos en sus fundamentos teóricos y metodológicos por los especialistas. De esta forma todo experto que descubre o crea nuevos materiales útiles para mejorar la salud deberá colaborar a esclarecer sus fundamentos y la capacidad predictiva de la teoría. Con base en estos aportes, sentar precedentes explícitos para descubrir nuevas dimensiones del quehacer científico que posibiliten hallazgos inéditos e inventos que parecían inaccesibles a la luz de las teorías anteriores.

Dado que estamos ante una ciencia joven, en vías de desarrollo de sus sistemas de medición y comprobación, es importante precisar mecanismos y sistemas de información para pasar de los nuevos descubrimientos científicos de las ciencias básicas de la nanomedicina a las creaciones tecnológicas y a sus aplicaciones clínicas.

Artículo 2.2: La ciencia supone colaboración humana, complemento entre las nuevas verificaciones empíricas, incluso si éstas muestran nuevos hechos que contradigan los descubrimientos anteriores. Las falsaciones no deben ser vistas como reprobación, sino como un conjunto de nuevas luces que revelan anomalías, quizá errores cuya explicación novedosa dá lugar a nuevos horizontes y nuevas esperanzas.

Artículo 2.3: El investigador debe partir de una perspectiva diacrónica y sincrónica del quehacer científico que le revele constantemente pautas de colaboración, integración y unidad. La formación de las nuevas generaciones debe estar imbuida en esta atmósfera de cooperación.

Artículo 2.4: Las disciplinas científicas separadas han sido históricamente claves para el desarrollo del conocimiento experto y verificable del mundo contemporáneo; no obstante, hoy, los grandes logros de diversas perspectivas de la ciencia muestran la necesidad de colaboración sistemática. Se han desarrollado trayectorias integradoras en transdisciplinas como la astrofísica, físicoquímica, neurolingüística y otras muchas más. Estas transdisciplinas nos muestran la inminente necesidad de integración

de los departamentos estancos de las ciencias. La importancia de desarrollar proyectos comunes y con ellos nuevas formas de acoplamiento metodológico, complementación y planes de cooperación. Estas formas de integración son hoy más importantes que nunca para el buen desarrollo de la ciencia nanomédica y deben ser impulsados.

La nanotecnología en general y la nanomedicina en particular son unimaginables sin una integración de perspectivas múltiples: en particular de la física, la química, las matemáticas, la fisiología celular, biología molecular, histología, genética, medicina clínica y otras más.

Artículo 2.5: La colaboración interdisciplinaria, internacional, interinstitucional de las perspectivas científicas en beneficio de la salud individual y social es una necesidad ingente en nuestros días y debiera ser una norma fundamental del quehacer científico. Nuestra sobrevivencia y dignificación humana dependerá en gran medida de la sabiduría con la que logremos colaborar e integrar las diversas perspectivas científicas de ayer, de hoy y de mañana.

Artículo 2.6: Es importante que la investigación científica y en particular la investigación en nanomedicina se impulsen en todos los países, pues los logros útiles para una sociedad debieran siempre adaptarse a su idiosincrasia, a las condiciones locales y a las culturas de esa sociedad, sin dejar de mantener un lenguaje común y un diálogo permanente entre la comunidad científica a nivel mundial.

Artículo 2.7: Es conveniente que la investigación científica y en particular la nanomedicina sean auspiciadas por los gobiernos, la sociedad civil, las empresas privadas, las instituciones de educación superior y por la solidaridad internacional. Los investigadores y las instituciones deberán buscar formas de integración y cooperación cada vez más orgánicos y estrechos con diversas instituciones con el objeto de hallar colaboración social y crear conciencia de la importancia de este nuevo recurso social, capaz de coadyuvar en la solución de los grandes problemas de salud.

Artículo 2.8: El investigador, en particular en el terreno de la nanomedicina, debe organizarse para ofrecerle sus frutos a la sociedad en pago de los recursos múltiples que la misma sociedad le ha dado desde su nacimiento: alimentación, escuela, salud, etcétera.

Artículo 2.9: La investigación en nanomedicina deberá desarrollarse como:

- Investigación básica, fundamental para consolidar la teoría y brindar así nuevas posibilidades de avance.
- Investigación aplicada, para ofrecer resultados prácticos y orientados a la solución de problemas específicos.

Artículo 2.10: Las conquistas de largo alcance se han preparado mediante la acumulación de saberes en campos diversos asociados al tema y al problema a tratar y también gracias a la crítica de los conocimientos acumulados; mediante el desarrollo de tradiciones y también por razón del enfrentamiento entre paradigmas. Por lo mismo, deben auspiciarse tanto el desarrollo y la memoria de tradiciones científicas, como las perspectivas críticas fundamentadas. Ambas son patrimonio de la humanidad y un bien para la salud y la vitalidad de los seres humanos.

Artículo 2.11: Los logros colectivos de la ciencia requieren de investigadores individuales. Por lo cual, debe preservarse siempre un ámbito para desarrollar la libertad del investigador, pues debe propiciarse que el ingenio particular y único de cada persona muestre sus talentos excepcionales. La creatividad personal y la intuición del

científico deben contar con un espacio razonable para gestarse, de tal manera que en ese ámbito se pueda desarrollar el sentido crítico y la proyección novedosa.

Artículo 2.12: Sin embargo, aun siendo sumamente importante el aporte individual, todo logro de un investigador está basado en logros y apoyos colectivos múltiples como son los alimentos que ese investigador recibió desde pequeño, junto con el lenguaje, el cariño, la cultura, tradiciones, instituciones, desarrollos teóricos y metodológicos. Por eso mismo, el investigador tendrá siempre la deuda y el deber moral de servir a la humanidad, de retribuirle lo que ha recibido de ella.

Artículo 2.13: Todo investigador tiene una responsabilidad moral de servir a la sociedad. Esta responsabilidad moral no siempre coincidirá con una obligación jurídica. Sin embargo, este código de ética apela a la responsabilidad moral de todo investigador a fin de que se asuma como servidor de su sociedad local, nacional e internacional.

CAPÍTULO 3. SOBRE LAS RELACIONES MÉDICO PACIENTE Y EL USO DE LA NANOMEDICINA

Artículo 3.1: Todo médico que use nuevos materiales, especialmente los materiales nanoestructurados, tiene la responsabilidad de conocer los resultados básicos de la experimentación científica, las ventajas comparativas y potenciales, los riesgos o efectos secundarios que este nuevo recurso a su alcance acarrea. Por lo menos de conocer los que ya se hayan especificado.

Artículo 3.2: Tanto la experimentación como el suministro de los medicamentos, ya sea que estén basados en nanoestructuras o no, deben respetar la vida humana y la dignidad de toda persona, de toda comunidad, tanto en su integridad física como moral.

Artículo 3.3: Las nano partículas deben aplicarse con el mismo cuidado a todo ser humano que lo necesite, según los criterios de la ciencia médica, o nanomédica, sin distinción de raza, estamento, clase social, sexo, religión o circunstancia personal o social. Todo acto de discriminación debido a las condiciones antes señaladas en este artículo es reprochable y deberá ser sancionado.

Artículo 3.4: La salud de la persona humana, de la sociedad y del medio ambiente es la prioridad fundamental del ejercicio de toda ciencia y tecnología, incluida la nanotecnología y la nanomedicina.

Artículo 3.5: El científico que elabora materiales nanoestructurados para el uso médico tiene la obligación de proporcionar la información adecuada a fin de que éste comprenda los procesos y pueda explicar a sus pacientes el tratamiento que se les proporciona, así como de la eficiencia y del grado de toxicidad de cualquier material nanoestructurado.

Artículo 3.6: En principio, el médico deberá presentar análisis, verificaciones clínicas y relaciones estadísticas pertinentes para el desarrollo científico de materiales nanoestructurados destinados a promover la salud, a fin de apoyar el desarrollo de la nanomedicina, con tal de que se respete el derecho de los enfermos a la intimidad. Ésta, en principio, deberá guardarse siempre. Incluso la muerte del paciente no exime al médico del deber de mantener esta privacidad e intimidad.

Artículo 3.7: Ya sea a título personal, a través de sus organizaciones profesionales o aliado a la sociedad civil, el médico debe llamar la atención de la sociedad local, na-

cional o internacional, sobre las deficiencias que impiden la correcta aplicación de los tratamientos médicos o nanomédicos, de calidad, ya sea por falta de recursos técnicos o por el excesivo encarecimiento de los medicamentos de última generación.

Artículo 3.8: Hoy existe una variedad importante de tradiciones y racionalidades médicas: homeopatía, alopátia, naturismo, acupuntura y otras más. La nanomedicina se ha pensado principalmente en torno a la medicina alópata en general, en sus diversas corrientes y tradiciones. Sin embargo, la nanomedicina está en condiciones de colaborar con diversas prácticas médicas, y es conveniente que colabore con ellas siempre y cuando estas tradiciones fundamenten sus teorías y sus prácticas.

CAPÍTULO 4. SOBRE EL DIAGNÓSTICO NANOTECNOLÓGICO

Artículo 4.1: Una de las grandes esperanzas es tener los diagnósticos antes de que los síntomas agudos se presenten, gracias al uso de dispositivos y materiales nanoestructurados inteligentes que se orienten directamente a las células dañadas antes de que se produzcan síntomas desagradables para el paciente. Dado que hoy estos diagnósticos presintomáticos ya son posibles en los laboratorios de investigación nanomédica, la nanomedicina deberá, en la mayoría de los casos, permitir en el futuro próximo trabajar antes de que se presenten enfermedades y procesos serios de degradación orgánica.

Artículo 4.2: Una mejor comprensión del funcionamiento del cuerpo humano a nivel nanométrico ha dado como resultado soluciones importantes como son: un mayor control de la diabetes mellitus tipo uno, detección de crisis en problemas neurodegenerativos antes de que sucedan. Hoy ya es viable la creación de nuevos instrumentos médicos de diagnóstico e imagen que hagan posible reparar directamente células dañadas. Esto debiera realizarse antes de que los daños celulares se extiendan y causen graves trastornos somáticos. La ciencia deberá perfeccionar estos sistemas de diagnóstico y reparación celular como un objetivo clave en los próximos años.

Artículo 4.3: En el marco de la nanotecnología se están desarrollando biomarcadores nanoestructurados específicos para ofrecer un diagnóstico acertado y personalizado. De esta forma se pueden evitar patologías antes de que los síntomas aparezcan. En general, cuando estos análisis se realicen deberán ser pertinentes, apropiados, fiables y al menor costo posible.

Artículo 4.4: En el terreno de la nanomedicina, las pruebas no deberían ocasionar grandes molestias al paciente. La nanomedicina puede mejorar las pruebas de diagnóstico *in vitro*, mediante tecnologías más sensibles y que actúan a nivel atómico y molecular. En un futuro próximo se podrán practicar en casa por el mismo paciente o quien lo acompañe. Un ejemplo de esto lo podemos ver ahora con el uso de los glucómetros para diabéticos, que sin tener que acudir al hospital pueden saber sus niveles de glucosa en 5 segundos después de poner una pequeña gota de sangre en el detector.

Artículo 4.5: La nanomedicina deberá tender a disminuir el costo de la detección temprana de una enfermedad, como, por ejemplo, en diferentes tipos de cáncer.

Artículo 4.6: En principio, debieran adoptarse procedimientos de diagnóstico nano, siempre que sean posibles, ya que tienden a ser más específicos que los tradicionales. El proceso puede ser más laborioso y costoso, pero en el mediano o largo plazo el ahorro es inminente, pues se atiende al paciente tempranamente, con el consiguiente ahorro de hospital, quirófano, etcétera.

La nanomedicina es una ciencia interdisciplinaria y transdisciplinaria que permite prever procesos degenerativos. Un ejemplo de esto son imágenes moleculares que hacen uso de químicos específicos y desempeñan un papel crucial para la localización y puesta en escena de una enfermedad. Por consiguiente debieran adoptarse sus sistemas de diagnóstico.

Artículo 4.7: Recomendamos que, en principio, en los próximos años se empleen sistemas miniaturizados que permiten realizar diagnósticos a nivel sensores, como es, por ejemplo, la detección anticipada de una crisis epiléptica para evitar que ocurra. Pruebas como éstas podrán realizarse en cualquier parte y no sólo en centros de investigación. De esta forma, podrán obtenerse resultados sin ir a laboratorios clínicos.

Artículo 4.8: Cuando el paciente ha sido analizado por el médico, aunque haya encontrado en los primeros estudios un indicio de síntomas de una enfermedad, es importante que elimine los «falsos positivos», esto es, cuando la prueba da “positivo” pero no hay seguridad completa.

Artículo 4.9: Una vez que se diagnostica una enfermedad, se requiere una acción terapéutica. La decisión debe tomarse por expertos que ofrezcan al enfermo la mejor cura, tomando en cuenta siempre la relación terapéutica riesgo beneficio. Los procedimientos de diagnóstico usando nanomedicina proporcionarán una información crucial para la toma de decisiones clínicas y de planificación de la terapia.

Nunca deberá realizarse una operación o terapia costosa si antes no se ha justificado debidamente su realización mediante diagnósticos que permitan indicarlo razonablemente.

Artículo 4.10: Se buscará siempre que las pruebas de diagnósticos pre sintomáticos ocasionen un mínimo de molestias al paciente y que no la dañen en su salud o su integridad moral. Los profesionales de la nanomedicina deberán buscar siempre el acierto de su diagnóstico antes que cualquier otro objetivo. Es conveniente que los profesionales de la salud, apoyados en la nanomedicina y la bioinformática, asesoren a los pacientes y los hagan conscientes, en la medida de lo posible, de los procesos y los fundamentos de sus diagnósticos personalizados y pre sintomáticos.

Artículo 4.11: Los científicos de la nanomedicina dedicados al campo del diagnóstico pre sintomático deberán buscar mejorar las pruebas de diagnóstico *in vitro*, mediante tecnologías más sensibles y que actúen a nivel atómico y molecular. Una meta importante es que estas pruebas lleguen a practicarse en casa, *in vitro* por el mismo paciente o quien lo acompañe.

CAPÍTULO 5. SOBRE LA NANOMEDICINA PREVENTIVA

Artículo 5.1: Toda responsabilidad supone previsión, pero en esta era de la nanomedicina es un deber desarrollar sistemas sofisticados de previsión y de anticipación de patologías diversas. Por ejemplo, deberán desarrollarse biomarcadores aún más sofisticados que indiquen si se inicia una rara infección, o una respuesta no esperada a partir de una intervención terapéutica, si hay una reacción inesperada a nivel de algunas células. Puede tratarse desde un gen alterado, un cambio en la producción de proteínas, hasta cambios metabólicos o incluso de transformaciones en las características físicas de las células. Los biomarcadores pueden ser analizados usando el diagnóstico *in vitro* de muestras, o que se pueden visualizar y cuantificar *in vivo*; pero su eficiencia deberá mejorarse exponencialmente en los próximos años.

Artículo 5.3: Apoyados por análisis nanotecnológicos y en la bioinformática, los profesionales de la salud deberán asesorar a los pacientes exitosamente y proporcionarles formas de prevención personalizada.

Artículo 5.3: La nanomedicina deberá promover el fortalecimiento, la higiene y la elevación de la calidad de vida, tanto a nivel de la persona, como a nivel de la sociedad.

CAPÍTULO 6. SOBRE LA TERAPIA NANOMÉDICA

Artículo 6.1: El científico deberá buscar que el subministro de medicamentos nanoestructurados reduzca en lo posible o elimine efectos secundarios negativos.

Artículo 6.1.1: En la búsqueda de evitar efectos secundarios negativos, una de las aplicaciones más prometedoras de la terapia nanomédica es la liberación controlada del fármaco adecuado en el sitio dañado. Estos esquemas ya empiezan a usarse en el tratamiento de enfermedades crónicas con el objeto de garantizar la administración homogénea y regular de las dosis y de esta manera evitar variaciones importantes en la exposición tisular que pueden ser dañinas. Es importante que se desarrollen y se den a conocer a los terapeutas indicados estas técnicas de la nanomedicina y estos dispositivos nanoestructurados de liberación controlada; el material de los dispositivos deberá ser biocompatible y de preferencia biodegradable.

Artículo 6.1.2: En principio, es conveniente que la liberación del fármaco ocurra en el sitio requerido, en la proporción y la constancia adecuada y sin afectar otros sistemas del organismo; de esta forma se disminuye y se tienden a evitar efectos secundarios negativos en terapias prolongadas. El medicamento no recorrerá el torrente sanguíneo, sino que será liberado desde un material nanoestructurado en el órgano, tejido o célula dañada.

Artículo 6.1.3: En principio, se buscará que el fármaco se aproveche al máximo, al usar adecuadamente cada molécula. Esto tanto por razones de eficiencia curativa como de economía. Un claro ejemplo de desperdicio es el suministro de neurofármacos al sistema nervioso central, que ha constituido un reto para la neurología. La barrera hematoencefálica impide el paso de grandes cantidades de fármacos al cerebro. La nanomedicina ha descubierto alternativas viables para que los fármacos no tengan que cruzar la barrera hematoencefálica y sean depositados directamente en los tumores.

Artículo 6.1.4: Los científicos que diseñan nanodispositivos de liberación controlada, así como sus fabricantes, deberán asegurarse de que la salida del fármaco sea constante. En la medicina alópata tradicional puede darse fármaco de más o de menos; es decir, puede haber mayor o menor cantidad de la requerida. En un caso puede ser altamente tóxico y en otro no actuar con eficiencia. De esta forma es posible que se produzcan periodos cíclicos de toxicidad e ineficiencia. Con los sistemas nanotecnológicos de liberación controlada es posible mantener la concentración de fármaco constante entre esos dos niveles y liberarla de forma continua a largo plazo.

Artículo 6.1.5: La aplicación de los nanodispositivos de liberación controlada debe ser precedida por cálculos precisos de la salida del fármaco, la regularidad del suministro y su tiempo de duración.

Artículo 6.2: La nanomedicina en principio deberá orientarse a estimular los mecanismos endógenos de auto curación, ya que es verosímil que en el futuro esta ciencia desarrolle acciones reparadoras a nivel celular y molecular que auspicien la auto curación de células y órganos. Esto deberá promoverse no sólo para curar, sino también para fortalecer el sistema somático e inmunológico, así como la vitalidad de las personas.

Artículo 6.3: Podrán usarse nanotecnologías para mejorar las capacidades del cuerpo humano, su sistema inmunológico, sus flexibilidad, fortaleza, o agudeza del funcionamiento de algún órgano, cuando se hayan revisado los riesgos y evaluado la conveniencia de su uso. Por ejemplo, en lo que se refiere a trasplantes de chips retinales o cerebrales, podrán considerarse prótesis usadas en la dimensión micro o nano para mejorar las funciones del sistema somático de quien lo requiera, una vez que se compruebe su eficiencia y haya elementos suficientes para presumir que no causan patologías y perjuicios a corto, mediano o largo plazo.

Artículo 6.4: La nanoterapia deberá aumentar las garantías de las terapias de mínima invasión. En muchos casos, la terapia no se limita sólo a la medicación, sino que requiere de acciones terapéuticas más complicadas, ejemplo de ello pueden ser la cirugía o radioterapia. La planificación de estas terapias deberá basarse en diagnósticos razonables. La nanomedicina está generando una miniaturización de los aparatos que permiten procedimientos de mínima invasión y nuevas formas de tratamiento. Perfeccionar estas técnicas es un gran reto al que la nanomedicina deberá responder con éxito y eficiencia.

Artículo 6.5: En principio, la investigación en nanomedicina deberá orientarse prioritariamente a las enfermedades y los padecimientos que mayores estragos causan a la humanidad. Por ejemplo, el cáncer es la segunda causa de muerte en el mundo y con el aumento exponencial que hoy se detecta muy pronto será la primera. Este hecho convierte a la investigaciones contra el cáncer en prioritaria. Otro ejemplo en el cual habrá que centrar la atención es el del envejecimiento de la población: en las próximas décadas las enfermedades inflamatorias, como la artritis, y las neurodegenerativas causadas en su mayoría por la edad, tendrán un efecto abrumador, la nanomedicina deberá ofrecer perspectivas novedosas y eficientes en estos campos.

Artículo 6.6: Para la nanocirugía, deberán desarrollarse instrumentos quirúrgicos, tales como tijeras, pinzas, y diferentes dispositivos de mínima invasión. A pesar del avance de la nanotecnología, el camino hacia la nanocirugía puede tomar años, pero la fase científica en esta área ya ha comenzado. Actualmente existen robots utilizados para controlar una microcirugía en un quirófano cibernético. En principio, estos trabajos de investigación y de aplicación en animales deberán pasar, con el desarrollo de protocolos adecuados, a la experimentación clínica con seres humanos.

Al surgir la microcirugía con este desarrollo acompañado de equipo como el laparoscopia en 1980, se le dio más seguridad y confort al paciente, ya que la incisión es considerablemente más pequeña y se necesita un mínimo de espacio para la manipulación manual de instrumento y la visión del ojo humano a través de la fibra óptica.

Las ventajas de la nanocirugía deberán ser muy superiores. En el caso de la nanocirugía, se podrá trabajar en el nivel de cada uno de los organelos de las células afectadas. Las técnicas de nanocirugía deberán incluir, en principio, el uso de microscopía de fuerza atómica y láseres de respuesta en femtosegundos.

CAPÍTULO 7. SOBRE LA EXPERIMENTACIÓN EN SERES HUMANOS Y LAS COMISIONES DE ÉTICA

Artículo 7.1: Es fundamental la investigación científica para el avance de la nanomedicina. No obstante, se deberá experimentar primero en animales, siguiendo protocolos claros de experimentación, y después de verificar que los resultados son estadística-

mente exitosos, pasar a la experimentación con seres humanos. La salud de los seres humanos a quienes se aplique este tratamiento experimental es prioritaria, es decir, la salud del paciente es el objetivo primordial tanto para el médico como para el nanotecnólogo que ha desarrollado los nuevos materiales. Si hay que optar entre la salud o el éxito de la experimentación, indudablemente deberá privilegiarse la salud de aquel en quien se realiza la experimentación.

Artículo 7.2: Los protocolos de investigación en nanomedicina aplicada a seres humanos deben someterse a la aprobación previa de una Comisión de Ética con reconocimiento institucional que, en principio, revisará los procesos de investigación previamente realizados en animales.

Artículo 7.3: Tanto el médico que aplica un tratamiento experimental con base en materiales nanoestructurados como el científico que construye esos materiales están obligados a precisar la distinción entre procesos ensayo y aquellos que han sido aceptados, validados y sancionados para usarse en la práctica médica regular. En los casos ensayo se requiere de la autorización explícita del paciente, previamente informado, o de la persona que es responsable por él y que también deberá estar previamente informada. En principio, tanto el proceso de información al paciente como la aceptación informada del mismo o, en su caso, de la persona responsable por él, deberá hacerse por escrito y presentarse a la Comisión de Ética.

Artículo 7.4: La Comisión de Bioética que revise los procesos de experimentación en seres humanos deberá verificar:

- a. Que el tratamiento experimental que aplicará materiales nanoestructurados se oriente claramente a curar una enfermedad, en interacción directa con la materia biológica, para conocer, diagnosticar, prever, dar terapia, darle seguimiento a la evolución del paciente y fortalecer al cuerpo humano.
- b. Que haya protección especial de los seres humanos biológica, psicológica o jurídicamente débiles o vulnerables.
- c. Que se haya recogido el libre consentimiento de los individuos objeto de la experimentación. Este consentimiento deberá ser claro y específico. Si es un menor o incapacitado quien será objeto de experimentación, deberá ser igualmente libre y explícito el consentimiento de quien tuviera el deber de cuidarlo.

Artículo 7.5: Cuando la experimentación de materiales nanoestructurados se realiza sobre personas sanas que buscan mejorar su salud, nutrición o cualquier fortaleza, deberán evitarse riesgos. No deberá menoscabarse la dignidad de quien se inscribe para el experimento, ni deterioro de su conciencia moral. Es decir, no deberá haber ningún género de humillación ni de obligación a ir contra sus principios morales.

CAPÍTULO 8. SOBRE EL EVITAR EN LO POSIBLE LA TOXICIDAD

Artículo 8.1: Evitar en lo posible la toxicidad de los nuevos materiales nanoestructurados es fundamental. Por lo cual, la comunidad científica dedicada a la nanotecnología en general y a la nanomedicina en particular deberá reportar, previa verificación, cualquier indicio de toxicidad comprobable; y de preferencia acompañar su reporte de estimaciones cualitativas y cuantitativas: ¿qué modalidades de toxicidad se detectaron?, ¿de qué materiales aplicados a qué organismos?, ¿bajo qué circunstancia?

Estos reportes se pondrán en una página web a fin de que todo investigador relacionado con el campo de la nanotecnología en general y de la nanomedicina en particular, consulte periódicamente, para actualizarse en el conocimiento de los daños reales y potenciales a la salud y en la seguridad de las personas, sociedades y medio ambiente. Las autoridades sanitarias deberán desarrollar modos eficientes de comunicación para dar a conocer a la población estos riesgos, reforzar el conocimiento y la conciencia de los investigadores, y evitar los daños con que amenazan.

Artículo 8.2: Es fundamental que las autoridades sanitarias promuevan la definición de procedimientos o protocolos adecuados para la investigación en materia de nanotoxicidad.

Artículo 8.3: En la medida que se conozca y se compruebe la superior eficiencia y menor grado de toxicidad de un nuevo dispositivo o medicamento nanoestructurado, se sugerirá y propiciará la adopción de aquel que resulte más eficiente y menos tóxico.

Artículo 8.3: Los desechos de materiales nanoestructurados que se consideren tóxicos por las autoridades correspondientes deberán seguir un método, debidamente explicitado, que garantice la no contaminación y la asepsia adecuada. Los métodos presentados deberán ser evaluados por las autoridades encargadas de vigilar la salud y la ecología, para así generar estrategias de tratamiento de estos desechos tóxicos, tipificar y coleccionar casos que sean ejemplo de daños reales y posibles.

Artículo 8.4: Es importante que se desarrollen comisiones evaluadoras de las metodologías para detectar oportunamente la toxicidad de los materiales nanoestructurados, y especialmente aquellos dedicados a la medicina, la cosmética y al medio ambiente.

Artículo 8.5: Es importante que se desarrollen sistemas de protección para aquellas personas y medios ambientes que deban de exponerse a materiales nanoestructurados que resulten tóxicos o dañinos. Deberán preverse las reglamentaciones adecuadas a cada contaminante y circunstancia.

Artículo 8.6: También deberán revisarse críticamente las metodologías empleadas para estudios toxicológicos de efectos a largo plazo.

Artículo 8.7: A fin de proteger a los trabajadores de la salud es importante que se revisen los protocolos y medidas necesarias de seguridad a científicos, médicos, personal hospitalario y pacientes en lo que se refiere al uso de nanomedicinas y nanoprocedimientos.

CAPÍTULO 9. NANOMEDICINA PROTECTORA DEL MEDIO AMBIENTE

Artículo 9.1: Tanto los laboratorios de experimentación como la industria productora de nanopartículas deberán proteger al medio ambiente, ser libres de contaminantes y sustentables, es decir, sin deterioro de la ecología y, de preferencia, productores de más energía de la que ocupan, así como un árbol que da frutos, energía y bienestar al medio ambiente.

Artículo 9.2: Se buscará siempre proteger y fortalecer las cadenas alimenticias, especialmente aquellas que son base de la nutrición y la salud humana.

Artículo 10: Sobre la promoción de nuevas políticas públicas referidas a la nanomedicina

Artículo 10.1: En cada país deberán promoverse centros de investigaciones interdisciplinarios dedicados a la indagación sistemática en materia de nanotecnología en

general y de nanomedicina en particular. Estos centros deberán sentar las bases para fijar políticas internacionales, nacionales y locales referidas a la nanotecnología y a la nanomedicina, a fin de desarrollar sistemas de planificación para el desarrollo de estos campos del saber en cada país.

Artículo 10.2: Los centros de investigación deberán integrar bases de datos en las que se detallen los desarrollos y los efectos de estas ciencias, sus impactos y proyecciones económicas, sus consecuencias en la organización de la vida social. Es importante que estos centros de investigación de cada país tengan claros diversos procesos, como son: el desarrollo de patentes, escuelas, corrientes teóricas, centros de investigación, autores, los sistemas de dependencia que estas nuevas prácticas de la nanomedicina provocan en el mundo y en cada país, las consecuencias de estas dependencias y las medidas que deben tomarse para proteger a la sociedad local y nacional de estas posiciones dependientes.

Artículo 10.3: Los centros de investigaciones interdisciplinarios dedicados a la indagación sistemática en materia de nanotecnología y nanomedicina serán instituciones que auspicien la toma de conciencia de la población y de sus gobiernos sobre la importancia de desarrollar políticas coherentes con el desarrollo de la investigación, la producción y las prácticas de estas nuevas ciencias y sus paradigmas. La participación de las ciencias naturales, las sociales y las humanidades, todas integradas como un todo, es de suma importancia.

Artículo 10.4: La investigación en nanomedicina, referida a problemas específicos de la salud de cada sociedad, es muy importante y debiera impulsarse en todos los países, tanto para evitar costos excesivos de las patentes extranjeras, como para socializar el conocimiento y evitar la dependencia.

Artículo 10.5: Los gobiernos debieran auspiciar el desarrollo de la conciencia ciudadana en relación con las grandes ventajas que ya ofrece la nanomedicina y convocar a la participación ciudadana, al desarrollo de estructuras que propicien la generación de institutos de investigación sobre el tema, que se invite y se facilite la articulación en redes de estos institutos, que se impulse la incubación de empresas productoras o facilitadoras de la producción nanomédica y que los gobiernos alienten el apoyo y la inversión en esta materia. La inversión en este terreno deberá aumentar y mejorar las ventajas de la nanomedicina, socializar los beneficios que ofrezca y reducir costos innecesarios.

CAPÍTULO 11. SOBRE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO DE LA NANOMEDICINA

Artículo 11.1: Tendrán que desarrollarse programas educativos para formar a los futuros científicos en ciencias naturales, así como los provenientes de las ciencias sociales y las humanidades, que impulsarán, estudiarán, evaluarán y operarán los avances específicos de la nanomedicina y que, por tanto, tendrán que conocer y comprender los nuevos paradigmas y sus principios, sus modelos antes desconocidos y sus pautas de operación, sus técnicas de laboratorio, sus formas de relación con las personas que puedan usar o requieran los servicios de la nanomedicina.

Artículo 11.2: La educación para los futuros especialistas tendrá que plantearse sistemas de colaboración interdisciplinaria. Estos sistemas frecuentemente supondrán configuraciones complejas de de prácticas de comprensión y ayuda mutua. Ya

sea que los futuros especialistas se formen como científicos dedicados a la investigación básica o aplicada, como terapistas o planificadores sociales, tendrán que plantearse modalidades de integración de metodologías diversas. Todo esto supondrá reformas importantes a los planes, programas y prácticas académicas.

Artículo 11.3: Será una función importante educar a toda la sociedad y generar en ella una nueva conciencia que le permita comprender formas antes desconocidas de entender e involucrarse en el uso y específicamente en procesos de investigación, fomento de la creatividad científica, comunicación entre los investigadores del campo, en relación con el conocimiento del cuerpo humano, la prevención de enfermedades, diagnóstico, terapia, cuidado, monitoreo y fortalecimiento del ser humano.

Artículo 11.4: Desde los niños, los adolescentes, los trabajadores, las amas de casa, así como desde una gran gama de especialistas: médicos, maestros, legisladores, jueces, periodistas y muchos otros profesionistas más, deberán recibir información desde los gobiernos, las escuelas de educación básica y media, las universidades, los medios de comunicación bien asesorados y los organismos capacitados de la sociedad civil.

Artículo 11.5: Se recomienda a los gobiernos crear tanto bibliotecas tradicionales como en línea, con domicilios localizados, en las que se presenten diversas investigaciones en versión de divulgación y también en versión para especialistas, en las que se muestren los grandes logros de la biología molecular, el funcionamiento de nanomateriales diversos relacionados con la medicina, bioestructuras moleculares complejas y sus usos. También deberán repensarse los programas de matemáticas, de tal manera que contemplen el aprendizaje de modelos matemáticos de simulación molecular computarizados que den cuenta de sistemas biológicos complejos, de las interacciones fisicoquímicas con biomateriales nanoestructurados, así como de la transformación de las relaciones sociales, económicas y simbólicas que suponen los usos prácticos de estos materiales.

Artículo 11.6: En el futuro próximo, los estudiantes que cursan la educación media superior deberán aproximarse a la biología celular y a la composición atómica y subatómica de las células, así como a los procesos y transformaciones sociales que las aplicaciones prácticas de la nanotecnología y de la nanomedicina suponen. Es de gran importancia propiciar el entendimiento de los nuevos derroteros de estas nuevas ciencias.

CAPÍTULO 12. SOBRE LOS NEGOCIOS RELACIONADOS CON LA NANOMEDICINA

Artículo 12.1: Las ganancias de la empresa de investigación y fabricación de las nanopartículas destinadas a promover la salud humana no deberán exceder, en ningún caso, el 100% del capital invertido en el proceso de investigación, fabricación, presentación al público y distribución del producto terminado. La razón fundamental de este precepto es que la salud es indudablemente un derecho individual y social, parte elemental de los derechos humanos y de los derechos económicos, políticos y sociales consagrados por las Naciones Unidas. El lucro excesivo y el consecuente encarecimiento de los medicamentos hace imposible el logro de estos derechos elementales.

Artículo 12.2: El Estado debiera impedir la inversión para la producción de nanopartículas o nanoestructuras destinadas al uso médico, que no hayan sido probadas suficientemente en modelos de simulación y en animales.

CAPÍTULO 13. SOBRE LA REVISIÓN PERMANENTE DE ESTE CÓDIGO DE ÉTICA DE LA NANOMEDICINA

Artículo 13.1: Este código tendrá que revisarse cada semestre, en sus normas y sus aplicaciones prácticas dada la novedad de la especialidad y la rapidez con que surgen hoy las nuevas creaciones de materiales nanotecnológicos y en particular de los aplicados o aplicables a la nanomedicina. Es imperativo ponerlo en la perspectiva de los nuevos desarrollos, de las nuevas creaciones de nano materiales puestos al servicio de la medicina, a fin de auspiciar la generación de principios y normas que orienten cada vez mejor, por una parte, el desenvolvimiento ético y jurídico de quienes se dedican profesionalmente a la nanomedicina y, por otra, para generar criterios y políticas que sirvan mejor a los beneficiarios.

Simulación por computadora de nanomateriales para la conversión de energía solar*

YOSUKE KANAI**

RESUMEN. Las simulaciones por computadora están desempeñando cada vez un papel más amplio en el avance de nuestra comprensión y el diseño de nuevos nanomateriales para aplicaciones fotovoltaicas. En este artículo se discuten algunos ejemplos de cómo estas simulaciones computacionales se utilizan para obtener información importante en la comprensión de nanomateriales existentes y también para predecir nuevos nanomateriales para aplicaciones fotovoltaicas.

PALABRAS CLAVE: simulaciones por computadora, aplicaciones fotovoltaicas, nanomateriales

ABSTRACT. Computer simulations are playing an ever-expanding role in advancing our understanding and design of novel nanomaterials for photovoltaic applications. We discuss a few examples of how these computational simulations are being utilized to gain important insights into understanding existing nanomaterials and also to predict new nanomaterials for photovoltaic applications.

KEY WORDS: computer simulations, photovoltaic applications, nanomaterials.

INTRODUCCIÓN

Durante la segunda mitad del siglo xx, la computación se convirtió en una herramienta indispensable para la ciencia. Su progreso ha permitido que los científicos solucionen ecuaciones matemáticas de alta complejidad con mucha exactitud, lo cual ha conducido a un entendimiento científico muy detallado.¹ En muchas instituciones científicas del mundo, las supercomputadoras han jugado un papel crucial en la solución de grandes retos científicos, desde la comprensión de fenómenos astrofísicos tales como las supernovas, hasta la predicción del plegado de las proteínas. Hoy en día, algunas de las computadoras más veloces consisten en decenas de miles de CPUs (unidades centrales de procesamiento) que realizan tareas en paralelo.² Está en manos de los científicos y de los ingenieros proponer formas ingeniosas de utilizar numerosas CPUs simultáneamente para que las computadoras efectúen tareas en forma eficiente. Esto no sólo requiere de conocimientos profundos en computación, sino también de formulaciones matemáticas que describan los problemas científicos que necesitan solución.

El reto más importante que se nos presenta actualmente es el calentamiento global.³ Se considera que la causa de este alarmante cambio es el enorme aumento de dióxido de carbono en nuestra atmósfera, proveniente de la combustión de combustibles fósiles.⁴ El uso de la energía solar es una de las soluciones más prometedoras

* Traducción de María Isabel Pérez Montfort.

** Berkeley Nanosciences and Nanoengineering Institute, University of California, Berkeley, CA, USA; y Condensed Matter and Materials Division Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA (Dirección actual).

¹ Por ejemplo, ver *Scientific Discovery through Advanced Computing*, website en <http://www.scidac.gov/>.

² Para conocer una revisión reciente, consultar <http://www.top500.org/>.

³ United Nations Framework Convention on Climate Change (<http://unfccc.int>).

⁴ *Ibidem*.

al reto de hacerle frente a esta alarmante tendencia, antes de que sea demasiado tarde. Para que la energía solar realmente sea una alternativa viable de los combustibles fósiles tales como aceites y carbón para la producción de electricidad, debemos desarrollar los fundamentos científicos que permitan un despliegue de la tecnología de energía solar económicamente más competitivo [1]. Al centro de esta tecnología hay un fenómeno científico fundamental llamado el efecto fotovoltaico, que convierte la luz (fotones) en electricidad (flujo de electrones) en los materiales. Hablando conceptualmente, algunos materiales absorben fotones del sol y “excitan” a un electrón, que se desplaza de su lugar original, creando un “hueco”, y estos “electrones excitados” y “huecos” pueden fluir dentro de los materiales y ser recolectados en el extremo opuesto, en donde los materiales están conectados a electrodos metálicos.

A pesar del gran potencial de uso del efecto fotovoltaico para convertir fotones del sol en electricidad, la eficiencia y el costo de utilizar celdas fotovoltaicas todavía es considerablemente más alto por kilowatt-hora que la energía obtenida a partir del carbón, del gas o del aceite [1]. Hoy en día, esta desventaja económica, desafortunadamente, representa un obstáculo significativo para la expansión de las celdas fotovoltaicas. Por lo tanto, una pregunta científica importante es: ¿sería posible realizar la misma tarea en forma más eficiente, utilizando materiales cuya fabricación sea menos costosa que la del silicón cristalino?

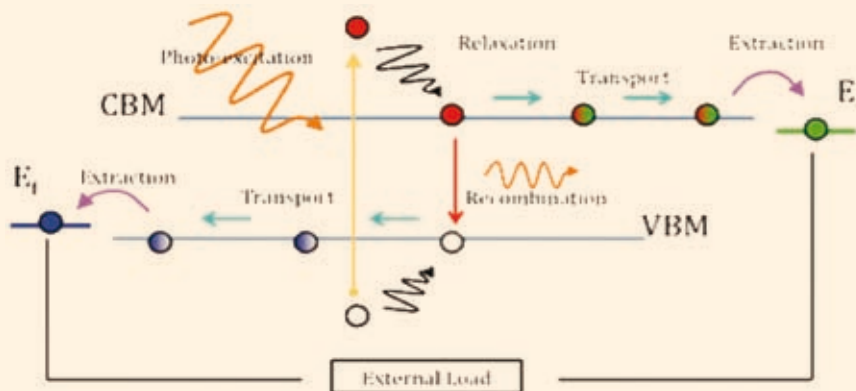
Es aquí donde surge lo emocionante del uso de los nanomateriales. Éstos se caracterizan por tener propiedades a escala nanométrica (nano es 10^{-9}). Cuando los materiales son así de pequeños, se posibilita el control de sus propiedades mediante la modificación de su tamaño, su forma y sus superficies, así como de los materiales que los componen. Una nueva generación de celdas fotovoltaicas, basada en materiales a nanoescala, ha recibido enorme atención en años recientes por su potencial para reducir dramáticamente los costos de convertir la energía solar en electricidad [2]. Estas nuevas oportunidades aparecen por el costo y la densidad de defectos relativamente bajos de los nanomateriales y por avances importantes en nuestra capacidad de controlar las propiedades ópticas, electrónicas y estructurales de materiales inorgánicos y orgánicos a escala nanométrica. Por ejemplo, utilizando los mismos elementos del Seleniuro de Cadmio, pero modificando su tamaño, se pueden controlar las propiedades ópticas de los nanomateriales.⁵ Para comprender por qué la capacidad de controlar las propiedades de los materiales es importante en el diseño de nuevos nanomateriales ideales para las celdas fotovoltaicas, debemos examinar con algún detalle cómo funciona una celda fotovoltaica.

LOS NANOMATERIALES Y LA CELDA FOTOVOLTAICA

La figura 1 ilustra cada uno de los pasos descritos a continuación. El primer paso es la absorción de un fotón solar por material fotovoltaico, lo que resulta en la excitación de un electrón y crea un “hueco” en el material. En el siguiente paso, este electrón excitado y el hueco se “relajan” hacia lo que se llama el mínimo de la banda de conducción (CBM del inglés *conduction band minimum*) y el máximo de la banda de valencia (VBM del inglés *valence band maximum*) [el orbital desocupado de más baja energía (LUMO) y el orbital ocupado de más alta energía (HOMO) se utilizan sinónimamente en

⁵ Ver, por ejemplo, <http://www.nd.edu/~mkuno/>.

FIGURA 1. Esquema de los procesos físicos involucrados en la operación fotovoltaica. Ver texto para más detalles.



los nanomateriales, respectivamente]. En los materiales hay muchos “niveles de energía” que pueden ser ocupados por el electrón excitado y el hueco. El electrón excitado busca ir a niveles de energía más bajos en la banda de conducción (CB) y el hueco busca escalar a los niveles de energía más altos en la banda de valencia (VB), de tal manera que la energía se minimiza. En este proceso, una porción de la energía se pierde como energía térmica de los átomos (de los núcleos, para ser más precisos) de los materiales. En muchos materiales, el relajamiento del electrón excitado y del hueco ocurre muy rápidamente; por ejemplo, en el silicón cristalino este proceso toma del orden de picosegundos o menos.

El electrón excitado y el hueco interactúan, resguardados por otros electrones que los rodean en el material. El concepto de “*excitón*” se utiliza para describir esta interacción de atracción entre las dos partículas, que renormaliza los efectos de los alrededores en una interacción efectiva de dos partículas. En muchos materiales a nanoescala, el electrón excitado y el hueco están estrechamente unidos y, por lo tanto, la atracción es muy fuerte comparada con la que hay en materiales de mayor tamaño. Una cuestión importante de las celdas fotovoltaicas basadas en materiales a nanoescala es que el excitón se debe disociar en dos cargas “libres” (electrón excitado y hueco sin interacción) para poder ser transportadas independientemente y en direcciones opuestas a través de un material hacia los electrodos metálicos. Es hasta entonces que las cargas se pueden extraer de los electrodos metálicos correspondientes.

Es importante mencionar que estos procesos físicos de operación de la celda fotovoltaica compiten con el proceso indeseado de que el electrón excitado se combine con el hueco y se “desexcite” el material. Por lo tanto, estos procesos deben ocurrir tan eficientemente como sea posible para que pueda efectuarse el proceso de recombinación.

Discutiremos ahora las ventajas y los retos de utilizar estos nanomateriales. Como es fácil de imaginar, un material óptimo para la operación de una celda fotovoltaica debe ser capaz de realizar varias tareas distintas. Por ejemplo, debe poder absorber fotones solares eficientemente y que la pérdida de energía durante la absorción sea limitada. Asimismo, el material debe ser capaz de transportar al electrón excitado y al hueco eficientemente. También es importante que el material tenga buen contac-

to con el metal de los electrodos. Una de las razones por las cuales hay entusiasmo por el uso de nanomateriales es que podemos controlar sus propiedades para cumplir estos requerimientos, manteniendo bajos los costos de procesamiento (al contrario que con el silicón cristalino). Sin embargo, existen algunos retos en el uso de nanomateriales para la operación de celdas fotovoltaicas. Esto es, dado que en los nanomateriales el electrón excitado y el hueco están estrechamente unidos, se deben separar de alguna manera, pues si no, las cargas no se pueden mover independientemente y terminarán recombinándose. Este proceso de “separación de cargas” es una de las cuestiones importantes que se pueden analizar utilizando la simulación por computadora para aumentar nuestro conocimiento del mecanismo y mejorar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas [3].

Antes de entrar en materia sobre cómo la simulación por computadora se utiliza para comprender y predecir la llamada “separación de cargas” del electrón excitado y el hueco en los nanomateriales, necesitamos analizar un asunto más. El electrón excitado y el hueco no son partículas común y corrientes como pelotas de tenis. Por el contrario, estas partículas se comportan según las leyes de la mecánica cuántica, cuya explicación excede el ámbito de este artículo y pueden consultarse en excelentes libros de texto [4]. Lo único que necesitamos saber en este momento, es que estas partículas no tienen una posición fija en el espacio como podría pensarse a partir de la figura 1. Su posición se describe como una distribución de probabilidades en función del espacio. Tienen una cierta probabilidad de estar en un sitio específico, pero no se puede asegurar que la partícula realmente esté allí.⁶ Aunque es éste un concepto extraño, todos los experimentos indican que es verdadero cuando se trata con objetos realmente pequeños, como los electrones.

SEPARACIÓN DE CARGA EN LOS NANOMATERIALES

Una idea interesante y prometedora es la de utilizar materiales orgánicos, por ejemplo, polímeros, en lugar de materiales inorgánicos como el silicón [5]. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, el electrón excitado y el hueco deben separarse una vez que el fotón solar sea absorbido para que las cargas puedan transportarse independientemente hacia los electrodos. Para lograr esto, los científicos han producido una interfaz entre el polímero P3HT y el fullereno, una molécula con forma de balón de fútbol (figura 2).

Gracias a los niveles de energía (descritos en la figura 3) que se encuentran en esta interfase, el electrón excitado salta hacia el fullereno [6]. Es importante recordar que el electrón excitado se mueve hacia niveles más bajos, mientras que el hueco se mueve hacia niveles más altos para minimizar la energía, tal y como se describió anteriormente. La idea de introducir algún otro material para lograr la separación de cargas ha dado buenos resultados.

Una pregunta interesante es la siguiente: ¿cómo podemos mejorar este arreglo del polímero/fullereno? Para contestarla, debemos tomar en cuenta que el electrón excitado debe saltar del fullereno a otra molécula y así logre llegar al electrodo. Existen materiales unidimensionales y elongados llamados nanotubos de carbono (NTC) que son afines a las moléculas de fullereno (figura 4). Hay de distintos tamaños y tienen propiedades electrónicas diversas. Con simulación por computadora se ha es-

⁶ Copenhagen interpretation of quantum mechanics.

tudiado la interfaz entre el polímero y los NTC. Por ejemplo, se ha encontrado que, si se utiliza un tipo específico de NTC [5, 7], la interfaz con el polímero P3HT forma el alineamiento ideal de niveles de energía para lograr la separación de las cargas (descrita en la figura 3) [7]. A partir de la simulación por computadora, podemos predecir la fuerza que percibe un electrón adicional en la interfaz (figura 4) y otras propiedades importantes, difíciles de probar experimentalmente por la nano-escala de la interfaz.

La simulación por computadora puede utilizarse no sólo para comprender los nanomateriales ya conocidos, sino también para diseñar nuevos. Como mencionamos en la sección anterior, un aspecto del uso de los nanomateriales es que podemos proyectar sus propiedades en la nanoescala. Si tomamos en cuenta que las propiedades electrónicas de los nanomateriales se pueden afinar a partir de su tamaño, forma y superficies, también es posible controlar las propiedades intrínsecas de un nanomaterial individual para inducir la separación de cargas sin utilizar la interfaz, como es el caso del polímero/fulereno o del polímero/CNT. Inclusive un material bastante convencional como el silicio exhibe un amplio rango de conductas interesantes en la nanoescala. Motivados por la observación experimental de que los nano-alambres de silicio crecidos mediante la técnica llamada de vapor-líquido-sólido se hacen más estrechos, los científicos han explorado los aspectos fundamentales de cómo se puede modificar estructura electrónica de los nanotubos de Si al controlar su morfología a nanoescala [8]. Un aspecto modular de este trabajo es que el rompimiento de la simetría a lo largo del eje del alambre podría afectar los estados electrónicos LUMO y HOMO en forma distinta y puede llevar a que estos estados se encuentren en distintos sitios en el espacio.

El esquema superior de la figura 5 muestra, en simulación por computadora, que el electrón excitado y el hueco se pueden separar y se localizar en principalmente en extremos opuestos del nanotubo. Se pueden separar naturalmente conforme el electrón excitado y el hueco se mueven hacia abajo y hacia arriba, respectivamente, para minimizar la energía (figura 6). El campo actual de investigación computacional propone este nuevo e interesante enfoque para la separación de cargas, utilizando la capacidad de control intrínseca de los nanomateriales para celdas fotovoltaicas.

FIGURA 2. Modelo de interfaz entre el polímero P3HT (verde) y el fullereno (azul) utilizado para la separación de cargas en la celda fotovoltaica. (Véase la referencia 6 (b) para más detalles).

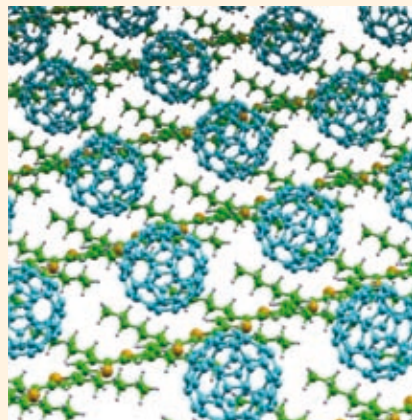


FIGURA 3. Esquema del proceso de separación de cargas en una interfaz ideal entre dos materiales distintos con alineamiento escalonado de los niveles de energía (tipo II). Los círculos rojos y blanco representan un electrón excitado y un hueco, respectivamente.

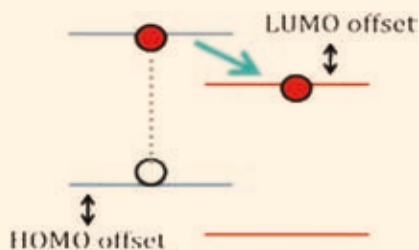


FIGURA 4. Modelo de interfaz entre el polímero P3HT (verde) y el CNT (morado) utilizado para la separación de cargas en celdas fotovoltaicas (izquierda). El potencial de atracción inducido para un electrón en la interfaz (derecha). (Véase la referencia 7 (b) para más detalles).

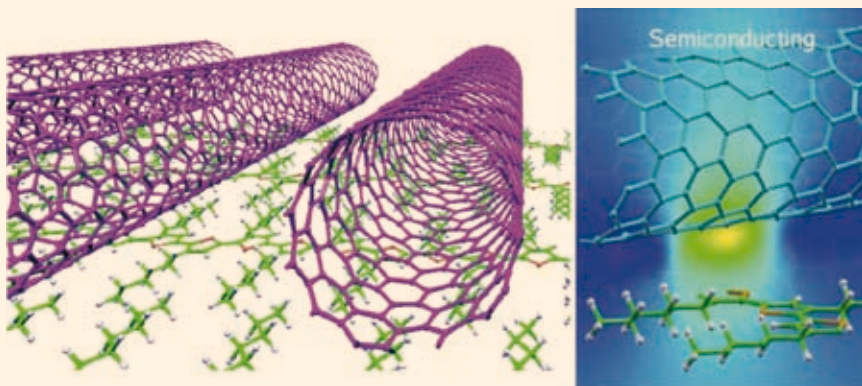


FIGURA 5. Separación LUMO (verde) y HOMO (azul) en un nanomaterial individual por control morfológico en un nanotubo que se estrecha.

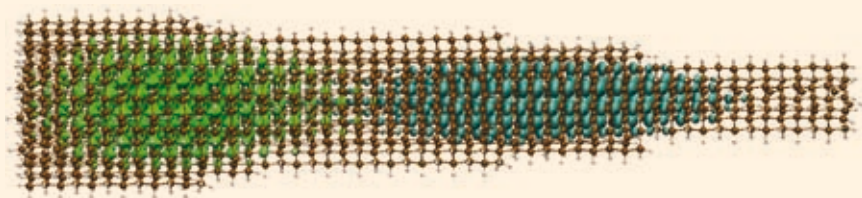
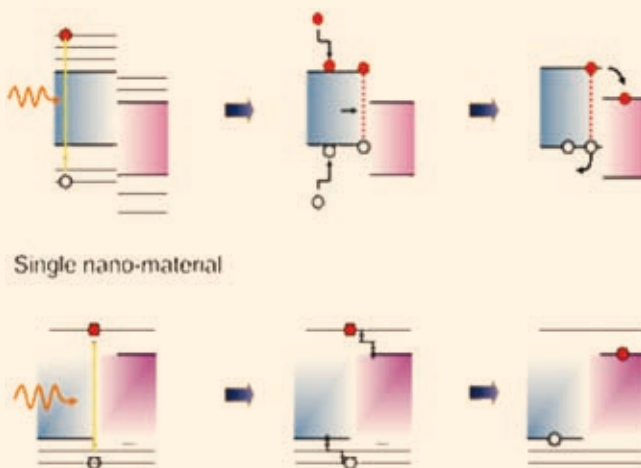


FIGURA 6. Esquemas de dos procesos distintos de separación de cargas: en la interfaz de dos nanomateriales (esquema superior) y en un nanomaterial individual diseñado, como el nano-tubo que se estrecha (figura 5) (esquema inferior).



CONCLUSIONES

Se examinan algunos de los aspectos más interesantes de la simulación por computadora para la comprensión de los nanomateriales y su uso en celdas fotovoltaicas. Como complemento de la investigación experimental, la investigación computacional puede contribuir extensamente al entendimiento de los mecanismos fundamentales involucrados en las celdas fotovoltaicas y descubrir nuevos caminos para aumentar la eficiencia de estas celdas, usando nanomateriales. Este campo de investigación científica se está expandiendo rápidamente y todavía quedan pendientes muchos descubrimientos inesperados. Esperamos que muchos alumnos se unan a nuestra convocatoria de avanzar la frontera del conocimiento en este campo de la investigación computacional.

REFERENCIAS

- [1] C. Wadia, A. P. Alivisatos, D. M. Kammen. 2009. *Env. Sci. Tech.*, 43, 2072.
- [2] Huynh, W.; Dittmer, J. J.; Alivisatos, A. P. 2002. *Science*, 295, 2425; Brabec, C. J.; Sariciftci, N. S.; Hummelen, J. C. 2001. *Adv. Funct. Mater.* 11, 15.; Coakley, K. M.; Liu, Y.; Chiatzun, G.; McGehee, M. D. 2005. *MRS Bull.* 30, 37. *Mater.* 2005, 15, 1617.
- [3] Y. Kanai, Z. Wu, J. C. Grossman, J. Mater. Chem. En prensa.
- [4] Ver, por ejemplo, D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*
- [5] Forrest, S. R. 2005. *MRS Bull.* 30, 28.
- [6] (a) N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, F. Wudl, 1992. *Science* 258, 1474.; (b) Y. Kanai and J. C. Grossman, *Nano. Lett.*, 2007. 7, 1967.
- [7] (a) J. Geng, T. Zeng, 2006. *J. Am. Chem. Soc.* 128, 16827; (b) Y. Kanai and J. C. Grossman, 2008. *Nano. Lett.*, 8, 908.
- [8] Z. Wu, J. B. Neaton, J. C. Grossman. 2008. *Phys. Rev. Lett.*, 100, 246804.

La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados

ROGELIO CARRILLO GONZÁLEZ*
Y MA. DEL CARMEN A. GONZÁLEZ-CHÁVEZ*

RESUMEN. La agricultura es considerada como la segunda área de aplicación nanotecnológica, después del área energética. Los proyectos actualmente en desarrollo se basan en la “agricultura sin pérdidas”; los principales componentes que se adicionarán en forma óptima y controlada son fertilizantes, plaguicidas y agua. La nanotecnología se pueden combinar con métodos convencionales y constituir alternativas promisorias para la remediación de suelos contaminados con metales pesados (vía su remoción o estabilización). Por ejemplo, el uso de partículas de hierro granular valencia cero (ZVI) y sus nanopartículas (NPs) aglomeradas o estabilizadas han sido exitosas para la reducción de Cr(VI) a Cr(III) en estudios de campo y de laboratorio. El presente trabajo muestra las posibles aplicaciones de las NPs en la agricultura y el ambiente al tiempo que ofrece ejemplos de uso en la detección de la contaminación, transformación de contaminantes y remediación del suelo.

PALABRAS CLAVE: limpieza de suelos, metales pesados, microorganismos del suelo, óxidos de hierro, remediación.

ABSTRACT. Agriculture is considered the second area of application of nanotechnology, after energy applications. The projects being developed are based on «zero-waste agriculture». The major components that are added together in an optimal and controlled way are fertilizers, pesticides and water. Nanotechnology can be combined with conventional methods and constitute promising alternatives for remediation of soils contaminated with heavy metals (via its removal or stabilization). For example, the use of particles of granular zero-valent iron (ZVI) and its agglomerated or stabilized nanoparticles (NPs) have been successful in reducing Cr (VI) to Cr (III) in field studies and laboratory. This work shows the potential applications of NPs in agriculture and the environment while providing examples of use in the detection of pollution, transformation of pollutants and soil remediation.

KEY WORDS: soil cleaning, heavy metals, soil microorganisms, iron oxides, remediation.

PANORAMA GENERAL

Se ha denominado nanociencia al estudio de fenómenos y a la manipulación de materiales a escala manométrica, es decir, 10^{-9} unidades de metro o sea nanómetros (nm). El intervalo de trabajo a nivel nano considera de décimos a unos cientos de nanómetros. Entonces, la nanotecnología involucra la producción y aplicación de sustancias o estructuras de menos de cien nanómetros.

La idea de clasificar los nanomateriales se fundamenta en el consenso de la reunión de la National Science Foundation intitulada “Periodic Patterns, Relationships, and Categories of Well-Defined Nanoscale Building Blocs” (Tomalia, 2008), basada en los siguientes supuestos:

* Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Texcoco, México. CP:56230. Tel/fax: +52 5558045900. Ext. 1184. crogelio@colpos.mx

1. Todas las partículas que tienen al menos una dimensión en el intervalo de 1 a 100 nm son NPs.
2. En relación con la escala atómica, tales NPs o nanomateriales pueden ser estructuras a nivel macromolecular; ensambladas, cristales, conglomerados, partículas u otros que son mil veces más grandes que los átomos. Contienen de mil a mil millones de átomos y un peso molecular que oscila de diez mil a diez mil millones de Daltons.

Estos materiales se pueden agrupar en dos categorías: NPs bien definidas y no definidas.

Categoría I. Las NPs bien definidas incluyen más de un 90% de formas monodispersas en composición, tamaño, masa, forma, superficie química y flexibilidad. Categoría II. Las no definidas, la constituyen nanomateriales solamente disponibles en formas polidispersas en función de la composición, masa, tamaño y forma.

Los materiales que muestran estructuras más rígidas, parecidas a látices, inflexibles, del tipo metálicas inorgánicas, se denominan como NPs duras. La primera clasificación se basó en el arreglo tradicional de la tabla periódica, asociada con las propiedades de conducción o semiconducción, que incluye metales, metaloides y compuestos inorgánicos como óxidos metálicos, calcógenos metálicos. Estos materiales tienden a formar cristales rígidos.

Otro tipo de materiales más flexibles, no conductores de electricidad, con propiedades aislantes y que forman enlaces covalentes semejantes a estructuras orgánicas, y cuyas estructuras químicas no cristalinas, más bien amorfas, la constituyen el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno. Estas partículas se asemejan a las estructuras biológicas (Tomalia, 2009).

La idea de poder trabajar con partículas menores a 100 nanómetros la propuso Richard Feynman desde 1959, pero fue en las últimas dos décadas cuando los logros en la producción de materiales han sido notables. La aplicación de la nanotecnología se ha centrado principalmente en la producción de materiales para las industrias y en la medicina o cosmetología; de manera que ahora muchos de los productos comerciales tienen como base el uso de NPs. En las áreas agrícola y ambiental, la implementación de estas tecnologías no ha sido tan rápida, debido aparentemente a la tasa de retorno de la inversión, pero constituyen áreas muy prometedoras. Los mayores avances, tanto en la nanociencia como en la nanotecnología, han sido en los países desarrollados, debido a la fuerte inversión que se ha hecho en estas temáticas. Pero, en los países en vías de desarrollo la presencia abrumadora de los problemas de producción de alimentos y ambientales aunados a la escasez de apoyos en inversión en infraestructura física y humana, obligan a pensar la nanotecnología como una opción para afrontar varios de esos problemas, partiendo de un enfoque interdisciplinario.

APLICACIONES E IMPLICACIONES

El desarrollo y aplicación de la nanotecnología en la agricultura y el ambiente implica la formación de grupos interdisciplinarios, debido a la conjunción de campos del conocimiento que son incluidos, si se busca la generación de técnicas de bajo impac-

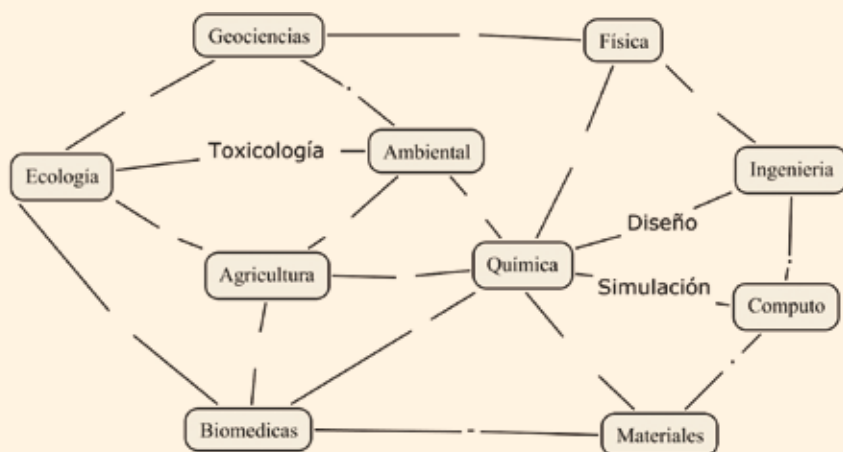
to ambiental y salud pública. La figura 1 muestra las disciplinas involucradas para el desarrollo tecnológico en estas áreas, que involucran actividades como diseño, preparación, evaluación a diferente escala y el manejo de residuos y desechos y sus efectos y transformaciones.

En el área agrícola y ambiental las NPs son importantes por su uso potencial en resolver problemas que con productos a escala normal son muy costosos y no siempre se solucionan eficientemente, y por las implicaciones o efectos que el uso de las NPs tienen en procesos o fenómenos. Respecto a la producción agrícola, la premisa básica es reducir al mínimo las pérdidas y disminuir los efectos adversos en el ambiente por el excesivo uso de insumos agrícolas (fertilizantes y plaguicidas). Además, si se considera que la reserva de la materia prima para su producción de fertilizantes fosforados ha disminuido, debido a la continua extracción que se ha hecho desde el inicio de la producción comercial, el uso eficiente de estos materiales es de alta prioridad y es estratégica a largo plazo.

En el primer caso, el uso de las NPs en agricultura incluye la producción de fertilizantes especiales, estimulantes del crecimiento y plaguicidas sistémicos. En el manejo postcosecha está el uso de materiales mejorados con NPs.

Por ejemplo, un problema del manejo eficiente de los suelo con reacción extrema, ácida y alcalina, es la baja disponibilidad de fósforo, ya sea porque en medio ácido se une por intercambio de ligandos a óxidos de hierro o a los coloides amorfos. O bien, porque en medio alcalino el fósforo está precipitado y unido al calcio. Como consecuencia, se tiene fijación del fósforo proveniente de la fertilización y baja disponibilidad para las plantas, que se refleja en altos costos de producción. Una solución alternativa es la producción de fertilizantes protegidos de la fijación. Es decir, diseñar partículas de fósforo que sólo esté disponible en condiciones específicas, por ejemplo, únicamente en el volumen de la rizosfera o sea cerca de la raíz. Entre éstos están los fertilizantes de lenta liberación por estar protegidos con poliestireno o con capas de minerales como la caolinita (Liu *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006). También, se han diseñado métodos para la recuperación de compuestos como el amonio de las aguas resi-

FIGURA 1. Disciplinas involucradas en la aplicación de la nanotecnología en la agricultura y el ambiente



duales y concentrarlos en NPS para usarlos como fertilizantes y así reciclar materiales de desecho (Allhoff y Lin, 2008); a la vez que se reducen los costos energéticos.

Los problemas de disponibilidad de los micronutrientes en medio alcalino es parecido al del fósforo, por lo que el uso de nanopaquetes de estos nutrientes que se activen al contacto de señales químicas específicas y liberen a los nutrientes podría bajar el costo de la fertilización. Se pueden preparar nanoquelatos para liberación controlada de nutrientes, sin afectar la calidad, aspecto y sabor de los productos agrícolas; nanogotas para la dispersión de vitaminas (Baruah y Dutta, 2009). También, la liberación controlada de hormonas de crecimiento puede lograrse a través de NPS. La producción y uso de nanosensores resulta relevante para detectar moléculas en sistemas de hormona:sustrato; para la detección de patógenos; en el control de las condiciones de crecimiento o en el monitoreo de microambientes y sus cambios durante la producción. Sin embargo, se debe tener especial cuidado con la evaluación de estos fertilizantes de nueva generación, pues se ha observado que algunas NPS como el ZnO pueden reducir el crecimiento de las plantas debido al daño que causan en la superficie de las raíces y en las células.

En este caso, el uso de NPS puede ayudar a incrementar la especificidad y eficiencia de herbicidas, o prolongar el periodo de actividad de los principios activos por liberación prolongada.

La nanotecnología también es útil como una tecnología ambiental y se maneja bajo el nombre de nanorremediación. Ésta se usa para proteger al ambiente, ya sea a través de la prevención, el tratamiento o la limpieza de sitios con desechos peligrosos (Karn *et al.*, 2009). Estos autores concluyeron que la nanorremediación *in situ* tiene diferentes ventajas: reduce el costo general y el tiempo de la limpieza de sitios contaminados; puede ser utilizada a gran escala; elimina la necesidad de tratamiento y disposición de suelo contaminado, reduce las concentraciones de los contaminantes casi a cero. Sin embargo, para prevenir algún impacto adverso ambiental se necesitan estudios profundos que evalúen el efecto de la nanorremediación a nivel ecosistema.

Los métodos de nanorremediación utilizan nanomateriales reactivos para la transformación y desintoxicación de contaminantes. Estos nanomateriales tienen propiedades que favorecen la reducción química y la catálisis para mitigar los contaminantes. Las propiedades de los nanomateriales permiten que puedan utilizarse *in situ*. Por ejemplo, las NPS pueden introducirse en espacios muy pequeños y distribuirse más rápidamente, que las partículas de mayor tamaño. Aunque no pueden moverse muy lejos del punto de inyección (Tratnyek y Johnson, 2006).

La mayoría de las aplicaciones ambientales de la nanotecnología consideran tres categorías:

- 1) productos sustentables ambientalmente benignos (química verde o prevención de la contaminación);
- 2) remediación de materiales contaminados con sustancias peligrosas y,
- 3) sensores para agentes ambientales.

En estas tres categorías se utilizan no sólo sustancias químicas o materiales no biológicos, sino también agentes microbianos y materiales biológicos, que se incluyen en la nanotecnología suave. Las nanotecnologías se orientan para desarrollar mejores métodos para la detección y descontaminación de agentes biológicos dañinos (Tratnyek y Johnson, 2006). Varios materiales se han probado para la remediación,

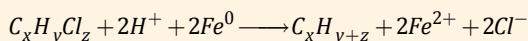
por ejemplo: zeolitas, óxidos metálicos, metales nobles (plata, paladio, cobre), dióxido de titanio, nanotubos y fibras de carbono y enzimas. Sin embargo, el más ampliamente usado es el hierro valencia zero (nZVI de sus siglas en inglés *zero-valent iron*, Fe⁰) (Karn *et al.*, 2009).

Para que la nanorremediación sea efectiva, se requiere la adecuada caracterización de los sitios: localización, condiciones geológicas (composición de la matriz del suelo, porosidad y profundidad del manto freático), propiedades geoquímicas (pH, fuerza iónica, oxígeno disuelto, potencial óxido reducción, concentración de nitratos, nitritos y sulfatos), así como concentración y tipo de contaminantes. Estas variables determinarán si las NPS serán capaces de infiltrarse a la zona a remediar y si las condiciones son favorables para la transformación de los contaminantes.

Ya se dijo que en el contexto ambiental las NPS tienen diversos usos posibles, pero su aplicación también conlleva consecuencias y riesgos. Se pueden usar para mitigar el efecto de contaminantes o en el tratamiento de aguas y suelos. Éstas tienen varias aplicaciones como es: la remoción de contaminantes del agua por catálisis, oxidación, reducción o adsorción. Por ejemplo, durante el transporte y almacenamiento de sustancias como los hidrocarburos han ocurrido derrames accidentales, la migración de estas sustancias al subsuelo causa la contaminación de las aguas subterráneas. La remoción de estos contaminantes es difícil y costosa; una opción es su degradación química, para lo cual hay que introducir agentes reductores a esa agua subterránea. Es aquí donde se ha propuesto usar NPS que contienen nZVI para descontaminar agua subterránea. Estas partículas tienen alta reactividad, debido a su extensa área superficial específica. Este elemento se ha usado en la descomposición de pentaclorofenol (Kim y Carraway, 2000) y otros plaguicidas clorados y colorantes (Sayles *et al.*, 1997).

Además, se manifiesta que su movilidad es limitada (menos de pocos metros), por lo que se supone que el riesgo de exposición del ser humano a estos compuestos es mínima, pues quedarían depositados en las rocas y paredes de los acuíferos. Los contaminantes que pueden ser degradados por estos materiales son bifenilos policlorados y etilenos clorados (Tratnyek y Johnson, 2006). También se ha reportado el uso exitoso del cobre con valencia cero, en un soporte de resina de intercambio, como donador de electrones, para la reducción de tetracloruro de carbono, aprovechando que a nivel nanoescala, el Cu⁰ es estable en agua (Lin *et al.*, 2005). El tiempo necesario para la reducción es menor. La descomposición de este tipo de compuestos es muy importante; pues en condiciones normales la vida media del tetracloruro de carbono es de 30 a 10 años.

La declorinación de compuestos halogenados como cloronaftaleno, 1,2 diclorobenceno, 1,3 diclorobenceno, 1,4 diclorobenceno, hexaclorobenceno, hexaclorobutadieno, hexaclorociclopentadieno, hexacloroetano, 1,2,4,5, tetraclorociclobenceno o 1,2,4 triclorobenceno, se ha realizado con el uso de NPS de nZVI, la reacción general que describe en proceso es:



El hierro actúa como un reductor (dona electrones) y libera los iones cloruro. Asimismo, se han ensayado algunos procesos de degradación de plaguicidas *ex situ*, como el pentaclorobifenilo (2,2',4,4',5 PCB) acoplado a un sistema de extracción con CO₂ (Wang y Chiu, 2009). Hay muchos ejemplos del uso de NPs para la transforma-

ción de compuestos orgánicos derramados en el suelo o cuerpos de agua, el cuadro 1 resume sólo algunos de ellos.

También se ha reportado la preparación de partículas bimetalicas como Pd-Fe, Pt-Fe y Ni-Fe para usarlas en este tipo de pruebas. Este proceso aún tiene algunos retos por abordar; como es la producción y acumulación de compuestos de cloro. La reducción de la actividad de las partículas de Fe^0 , posiblemente debido a la formación de capas pasivas de hidróxidos (FeO_2 y Fe_2O_3) y carbonatos (FeCO_3) en la superficie de las partículas (Zhang *et al.*, 1998). Los compuestos de hierro también se han usado como fuertes adsorbentes de metales y metaloides como el As, por lo que se espera que las NPs también funcionen más eficientemente para este propósito (Cundy *et al.*, 2008).

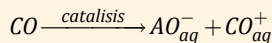
La oxidación fotocatalítica de algunos compuestos se ha reportado usando TiO_2 y ZnO, debido a que estos compuestos absorben luz ultravioleta. Se pueden producir distintas nanoestructuras de ZnO con relativa facilidad. Adicionalmente, se ha observado que inducir defectos durante la formación de los nanocristales de ZnO incrementa su capacidad fotocatalítica; también, que la inclusión de Mn y Co en estos óxidos puede cambiar la banda de adsorción de luz hacia el rango visible, ampliando con ello las condiciones de aplicación. Entre los compuestos que se han reportado pueden ser degradados por óxidos de titanio está: el dicamba (ácido 3,6 dicloro-2- metoxibenzoico), si se usa una lámpara de mercurio de 125 W simulando la luz solar (Prevot *et al.*, 2001). El 2,4 D (ácido dicloro fenoxiacético), tetraclorinfos, fenitrotion, metil pirimifos, metanol fenamifos y telone también se degradan catalíticamente al exponer el sistema a la luz del sol (Herrmann y Guillard, 2000).

También es posible oxidar plaguicidas organofosforados y heterocíclicos aromáticos nitrogenados por este procedimiento como Diazinon e Imidacloprid (Mahmoodi *et al.*, 2007).

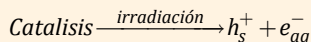
CUADRO 1. Ejemplos de algunos contaminantes tratados con nanopartículas

Sitio	Localización	Contaminante	Tipo de nanopartícula	Duración
Procesamiento de Al	Alabama	PCE, TCE y PCB	Carboximetil celulosa	29 de inyección
BP- Prudhoe Bay Unit	Alaska	TCA Diesel	Pd-nZVI	40.5 h
Slovakia-Browfield	Slovakia	TCE-DCE	nZVI	
NJ Former Chemicals storage facilities	Winslow Township, NU	PCE TCE DCE	nZVI	3 meses
Edison industrial	Edison, NJ	TCA,TCE, DCA, DCE cloroetano	nZVI	13 meses
Quebec Valcariter Garrison	Quebec, Canada	TCE, DCE, VC	nZVI, Catálisis con Pb	12 meses
Ringwood residential	Ringwood, NJ	Tetracloroetano, etilexilftalato, benzoantraceno	Catálisis con Metales nobles	2 días
Taiwan-solvent manufacturing plant	Kachsiung, Taiwan	1,1,2,2,TeCA 1,1,1 TCA TCE, Cr	Pd-nZVI	6 meses

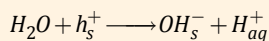
El mecanismo general propuesto por Pareek y Adesina (2003) para la oxidación catalítica de contaminantes orgánicos (CO) es la separación en catión orgánico (CO⁺) y anión orgánico (AO⁻):



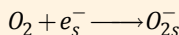
Generación de foto-vacíos y electrones durante la catálisis



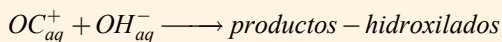
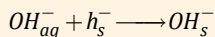
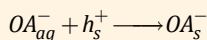
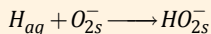
La disociación del agua, en presencia de los foto-vacíos, genera radicales OH⁻.



Adsorción electrofílica de los iones de oxígeno



Estos aniones y cationes son oxidados por los radicales OH⁻ procedentes de la disociación del agua.



Respecto a las consecuencias directas o indirectas del uso de los nanomateriales, el principal problema es el desconocimiento de los alcances de esos efectos, pues muchas de las NPs que se usan a nivel comercial, como parte de la formulación de productos, no fueron evaluadas extensivamente respecto a los daños que pueden causar a los organismos a mediano y largo plazo, ni considerando las posibilidades de bioacumulación. Las interacciones que ocurren entre las NPs y los sistemas biológicos son a nivel molecular.

Las NPs también pueden ser usadas para remover contaminantes inorgánicos del agua y de la solución del suelo, hay varios ejemplos de esto, como es el uso de las microesferas magnéticas que pueden ser de tres tipos: 1) esferas encapsuladas con polí-

meros; 2) esferas con partículas dispersas en el exterior y, 3) esferas con polímeros en la entrecara de polímeros y estructuras con partículas dispersas aleatoriamente.

El cromo es un elemento tóxico que puede estar presente en aguas superficiales y subterráneas y en suelos como contaminante, debido a que se usa ampliamente en la industria y en el procesamiento de pieles. La forma oxidada Cr(VI) es más móvil que el Cr(III) y tóxica para los organismos (cancerígeno) por lo que constituye un riesgo ecotoxicológico. La inmovilización de este elemento es uno de los puntos más importantes para reducir el riesgo de exposición. La forma tradicional de remover al cromo del agua es por reducción a Cr(III) por aplicación de agentes reductores como sulfato ferroso, dióxido de azufre o bisulfito de sodio. Sin embargo, recientemente se demostró que la reducción puede hacerse por reacción con Fe, la ecuación generalizada es:



Se ha comprobado que las NPs bimetalicas Pd/Fe > Pd/Zn > Ag/Fe > Ni/Fe > Zn/Fe > Pd/Cu > Cu/Fe son capaces de reducir el cromo hexavalente más eficientemente que micropartículas bimetalicas de Pd/Fe, Ag/Fe, Cu/Fe, Zn/Fe, Co/Fe, Mg/Fe, Ni/Fe, Al/Fe, Si/Fe, Pd/Cu y Pd/Zn y trimetalicas de Pd/Cu/Fe, Pd/Zn/Fe y Zn/Cu/Fe (Rivero-Huguet y Marshall, 2009). El dióxido de manganeso se ha probado con éxito para remover As de agua residual (Zhenzhong *et al.*, 2007).

Para el caso de los suelos, la fracción más reactiva la constituyen los coloides tanto orgánicos como inorgánicos; ya que su tamaño menor a 2 µm y su organización molecular les da una superficie enorme: de 10 a 700 m² por g de coloides secos. Esta reactividad natural permite al suelo poder soportar la vida de las plantas y su carácter amortiguador a los cambios. Los coloides son poliméricos, polifuncionales y polidispersos (Guo y Santschi, 1997). Análogamente las características de las NPs, que hacen se comporten de manera distinta que los compuestos de tamaño micro o macro, son la mayor reactividad debido probablemente a mayor área superficial, densidad y mayor reactividad intrínseca de los sitios reactivos en la superficie de la partícula (Tratnyek y Johnson, 2006). Lo anterior se refleja en la relación entre la superficie y el volumen de átomos, la fracción del volumen de las partículas comprimida por el grosor finito de la lámina de la superficie. Aunado a esto la posibilidad de diseñar los puntos de reacción e incluso las condiciones de reacción o interacción con los seres vivos, por ejemplo, la sensibilidad a cambios en el pH o tiempos de disolución. Tratando de imitar el funcionamiento de estos coloides, se han probado silicatos cubiertos con NPs de óxidos de hierro para incrementar la capacidad de adsorción de arseniato a través de intercambio de ligandos (Dousova *et al.*, 2006). Las nanozeolitas oxidan selectivamente tolueno (87%) en comparación con menos del 35% de selectividad utilizando zeolita convencional. Estas NPs también han sido útiles para oxidar benzaldehído (Masciangioli y Zhang, 2003).

PLAGUICIDAS

Los plaguicidas son sustancias usadas para eliminar o mantener baja la población de organismos no deseados, por sus efectos en la agricultura y actividad pecuaria, por ejemplo, insectos, hongos, ratones y otros organismos. En la década de los años cuarenta del siglo xx se inició la producción y uso de plaguicidas, en ese entonces se ignoraban los efectos a mediano y largo plazo de su uso a gran escala.

Algunas NPs de SiO_2 se pueden usar como insecticidas, ya que los insectos poseen barreras de lípidos cuticulares que los protegen de la pérdida de agua, la deshidratación y muerte. La absorción de estas NPs sobre la superficie de los insectos causa la ruptura de esas barreras de protección y la muerte del insecto por efecto físico (Barik, 2008). Por esto, es posible su aplicación para controlar plagas de plantas, hongos y ectoparásitos de animales (Ulrich *et al.*, 2005).

Este mismo tipo de partículas tiene alta capacidad de adsorción de proteínas, por lo que al interactuar con células como las del tejido circulatorio o de las membranas de las plagas pueden, a bajas concentraciones (0.1%), matar estos organismos. Con la ventaja de que no se adsorben en la cutícula de las plantas, ni causan alteración en la expresión genética de los insectos y teóricamente no se origina resistencia.

La adsorción de plaguicidas sobre minerales o componentes orgánicos del suelo como los ácidos húmicos, puede ser incrementada con la incorporación de cubiertas de NPs como el SiO_2 , lo cual permite reducir su biodisponibilidad y el movimiento por flujo de masas hacia las capas bajas de subsuelo. Entre los plaguicidas estudiados está la atrazina (Lu *et al.*, 2008).

La investigación y desarrollo de la nanotecnología en la agricultura y los temas ambientales se ha dirigido a los siguientes temas:

SENSORES MEDIOAMBIENTALES

Previo a la eliminación de contaminantes del suelo y del agua es necesario detectar su presencia, para ello se requiere desarrollar métodos de detección rápidos y confiables. Se ha reportado que es posible diseñar y construir biosensores para la detección de fenoles y compuestos derivados como catecol (Munteanu *et al.*, 1998); de compuestos poliaromáticos como el benzopireno (Alarie *et al.*, 1990); plaguicidas halogenados como las triazinas (Orozlan *et al.*, 1993); compuestos orgánicos volátiles (Ikariyama *et al.*, 1993) y sustancias inorgánicas como el mercurio (Pirvutiu *et al.*, 2001).

La detección de compuestos químicos en el ambiente, en los organismos o la disminución de nutrientes se ha hecho tradicionalmente por medio del análisis químico; ya sea por química húmeda o seca y usualmente implica el manejo destructivo de la muestra. Muchas de las metodologías son caras y se requiere tiempo para obtener resultados confiables pues, usualmente, son necesarios varios pasos para la separación y purificación de los analitos y, finalmente, la identificación.

Los sensores son instrumentos o herramientas que transforman magnitudes químicas o físicas en señales eléctricas, ópticas o térmicas, y se utilizan para la detección rápida de sustancias en el ambiente. Se usan para proteger la salud humana y del ambiente, por lo que su utilidad es principalmente en el área médica y para la detección analítica de compuestos. El desarrollo de los biosensores combina el reconocimiento de procesos biológicos o campos magnéticos que son traducidos a señales electrónicas o expresión de color (Farre *et al.*, 2009).

Pero, ahora, los nanomateriales ofrecen la posibilidad del diseño de una nueva generación de herramientas bioelectrónicas con funciones novedosas, también es posible la aplicación a detección de cambios químicos, bioquímicos *in situ*, y en tiempo corto. Se han diseñado sensores a nivel molecular para reconocer ciertas estructuras o compuestos (sustratos, enzimas, DNA, moléculas). Por esto la nanotecnología ofrece ser una herramienta muy importante para el desarrollo de sensores más potentes.

Los nanosensores prometen ser una alternativa sencilla, rápida, económica y viable para el monitoreo y detección de varios contaminantes; incluyendo los biológicos. Los polímeros son compuestos que pueden ser utilizados para el desarrollo de sensores, debido a su respuesta rápida ante variaciones locales y ambientales (Fernández-Barbero *et al.*, 2009).

Los nanosensores utilizan NPs, nanoclusters, nanowires y nanotubos, nanoestructuras embebidas en materiales de soporte como silicon poroso, nanoestructuras autoensambladas, nanoarreglos tipo receptor-ligando, etc. El cuadro 2 resume el desarrollo de los nanosensores y las principales aplicaciones en el ambiente; sin embargo, conforme se avanza en el conocimiento, se espera haya muy pronto mayor diversidad de aplicaciones.

Entre otras pruebas de la aplicación de los nanosensores al ambiente están las siguientes:

Liu *et al.* (2009) prepararon nanohojas de ZnO con estructura porosa y proponen su uso en la detección de contaminantes del aire intramuros como el formaldehído y el amonio.

Ray *et al.* (2008) reportaron el uso de NPs de oro para detectar mercurio y arsénico en suelos, agua y peces contaminados. Utilizaron una batería miniatura y muy barata que funciona con NPs de oro y se basa en la transferencia de energía de superficie del nanomaterial. El uso de esta nanoprueba es ultrasensible y detecta hasta 2 partes por trillón (ppt).

De acuerdo con Barry *et al.* (2009) los sensores electroquímicos pueden monitorear en el campo contaminantes químicos: gases como monóxido y dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxido nítrico; hidrocarburos orgánicos volátiles, aldehídos y cetonas, metales pesados, plaguicidas y contaminantes persistentes. Ahora, las investigaciones recientes van encaminadas al desarrollo y optimización de sensores para utilizarlos en diferentes matrices biológicas (sangre, saliva, orina, entre otros).

CUADRO 2. Algunos ejemplos de la aplicación de diversos nanomateriales para el análisis ambiental utilizando sensores

Tipo de nanomaterial	Uso	Referencia
Cristales de semiconductores inorgánicos	Detección de patógenos y toxinas	Goldman <i>et al.</i> (2004)
Partículas magnéticas	Detección de toxinas	Chemla <i>et al.</i> (2000)
Partículas de 1-pyrenemethylamine	Detección de Cu en agua	Wang <i>et al.</i> (2004)
Partículas de Ormosil (silica modificada orgánicamente)	Medición de oxígeno disuelto en agua	Koo <i>et al.</i> (2004)
Partículas de SnO ₂	Medición de diferentes gases control de la calidad del aire	Baraton <i>et al.</i> (2007)
Biosensor-DNA	Cuantificación de genes asociados a patógenos	Schofield <i>et al.</i> (1997)
Estructuras de Granamicin autoensambladas	Cuantificación de proteínas	Cornell <i>et al.</i> (2001)

Fuente: Rie *et al.* (2006) y Goldman *et al.* (2004).

La detección de plaguicidas puede realizarse con biosensores (Roger *et al.*, 1999), sensores ópticos (Rotiroti *et al.*, 2005), inmunosensores (Farré, *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2008). Hormonas, componentes farmacéuticos, fenoles, surfactantes son ejemplos de otros compuestos para detectarse y cuantificarse con inmunosensores (Farré *et al.*, 2007).

Crespilho *et al.* (2005) reportaron la preparación de una película nanoestructurada para detectar plaguicidas en solución. La película es muy plana, con rugosidad de 0.8 a 2 nm y con límite de detección de 1.6×10^{-9} mol/L. La capacidad de detección se debe a la bien definida electroactividad de la película que permite su uso como electrodo modificado para detección de plaguicidas vía electroquímica.

Mita *et al.* (1997) sugirieron la construcción de un biosensor enzimático con base en un nanotubo de carbón con tirosinasa, el cual determina la concentración de bisfenol A. Este contaminante, un alterador endocrino, frecuentemente está presente en agua superficial y para consumo humano, así como diversos productos para el consumo humano.

Tang *et al.*, (2008) demostraron que un nanoinmunosensor fue adecuado para detectar picloram, herbicida organoclorado, en arroz, lechuga y en el agua de riego. Las concentraciones de detección fueron de 0.005 a 10 µg/mL, con un límite de detección de 5 ng/mL. El inmunosensor presentó precisión, sensibilidad, selectividad y estabilidad de almacenamiento. Los autores sugirieron su uso para monitoreo de otros contaminantes orgánicos.

Iorio *et al.* (2008) analizaron el uso de una fracción polimérica orgánico-mineral disuelta de desechos líquidos del aceite del olivo, denominada polimerin, en la remediación de fenantreno. Además, estudiaron el efecto de la adición de óxidos de aluminio (Al_2O_3) en forma micro o nanoparticulada en este proceso. Sus resultados muestran que el polimerin tuvo mayor capacidad de enlazamiento al fenantreno que ambas partículas de aluminio. Adicionalmente, que el polimerin presentó 100 veces mayor capacidad de sorción a las NPs que a las micropartículas de aluminio. Al establecer sistemas con tres fases (fenantreno, NPs y polimerin) se observó que la capacidad del polimerin en la sorción de fenantreno se incrementó notablemente con las NPs de aluminio. Estos autores concluyeron que el tamaño de los óxidos de aluminio afectó significativamente la sorción de polimerin y fenantreno.

NANOFILTRACIÓN

FIGURA 2. Técnicas de filtración y tamaño de partículas y solutos

Micras	0.0001	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
Partículas o solutos	iones	sales	Coloides virus	Bacterias		Polen	Arena	
						Filtración de partículas		
				Microfiltración				
		Ultrafiltración						
	Nanofiltración							
	Hiperfiltración							

El uso de la nanotecnología en la filtración podría tener ventajas por incremento de la eficiencia en la remoción de sales durante el tratamiento de aguas residuales o en la potabilización del agua, superando así el problema que actualmente existe de la presencia de aluminio en el agua potable, derivado del uso de sulfato de aluminio como coagulante. Esto podría ayudar a reducir las implicaciones que este elemento tiene para la salud. La figura 2 compara los tamaños de partículas que pueden ser retenidas durante el uso de las distintas técnicas de filtración.

CONCLUSIONES

- El desarrollo de la nanotecnología aplicada a la agricultura y a la solución o prevención de problemas ambientales constituye un campo muy amplio por explorar.
- La implementación de paquetes tecnológicos de insumos agrícolas basados en nanomateriales podría reducir los costos de producción agrícola.
- El diseño de sistemas para reducir la contaminación usando NPs puede ser una alternativa factible, sin embargo, se debe tener cuidado especial en el seguimiento de las implicaciones a mediano y largo plazo de los efectos de su uso.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarie, J.P., D.J. Bowyer, M. J. Sepaniak, A. M. Hoyt , V. O. Dint. 1990. *Anal. Chim. Acta*, 236, 237.
- Allhoff, F., P. Lin. 2008. *Nanotechnology and society. Current and emerging ethical issues*. Springer Science. USA.
- Baraton, M.I., L. Merhari. 2004. *J. Nanopart. Res.*, 6, 107.
- Baruah, y Dutta. 2009. *Environ. Chem. Letter*, 7, 191.
- Barik, T.K., B. Sahu, V. Swain. 2008. *Parasitology Resource*, 103, 253.
- Barry, R.C., Y. Lin., J. Wang, G. Liu, Ch.A. Timchalk. 2009. *J. Exposure Sci. Environ. Epidemiology*, 19, 1.
- Crespilho, F., V. Cirzucolotto, J.R. Siqueira Jr. C.J.L. Constatino, F.C. Nart, O.N. Oliveira Jr. 2005. *Environ. Sci. Technol.* 39, 5385.
- Chemla, Y.R., H.L. Grossman, Y. Poon, R. McDermott, R. Stevens, M.D. Alper, J. Clarke. 2000. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 97, 14268.
- Cornell, B., G. Krishna, P.D. Osman, R.D. Pace, L. Wiczorek. 2001. *Biochem. Soc. Trans.* 29, 613.
- Cundy A.B., L. Hopkinson, R. L.D. Whitby. 2008. *Sci. Total Environ.*, 400, 42.
- Dousova, B., T. Grygar, A. Martaus, L. Fuitova, D. Kolousck, V. Machovic. 2006. *J. Colloids Interface Sci.*, 302, 424.
- Fernández-Barbero, A., I.J. Suárez, B. Sierra-Martín, A. Fernández-Nieves, F.J. de las Nieves, M. Márquez, J. Rubio-Retama, E. López-Cabarcos. 2009. *Adv. Colloid Interface Sci.* 147, 88.
- Farré M., L. Kantiani, S. Pérez, D. Barcelo, D. Barceló. 2009. *Trends Analytical Chem.* 28, 170.
- Farré M., L. Kantiani, D. Barceló. 2007. *Trends Analytical Chem.*, 26, 1110.

- Goldman, E.R, A.R. Clapp, G.P. Anderson, H.T. Uyeda, J.M. Mauro, I.L. Medintz, H. Mattoussi. 2004. *Anal. Chem.* 76, 684.
- Guo, L., P.H. Sanctschi. 1997. *Rev. Geophysics*, 35, 17.
- Herrmann, J.M., C. Guillard. 2000. *Surface Chem. Catalysis*, 23, 417.
- Ikariyama, Y., S. Nishiguchi, E. Kobatake, M. Aizawa, M. Tsuda, T. Nakazawa. 1993. *Sensors Actuators*, B 13, 169.
- Iorio, M., B. Pan, R. Capasso, B. Xing. 2008. *Environ. Pollution*, 156, 1021.
- Karn, B., T. Kuiken, M. Otto. 2009. *Environ. Health Perspectives*, Doi:10.1289/ehp-0900793.
- Kim, Y.H., E.R. Carraway. 2000. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 2014.
- Koo, Y.E.L., Y. Cao, R. Kopelman, S.M. Koo, M. Brasuel, M.A. Philbert. 2004. *Anal. Chem.* 76, 2498.
- Li, X.-M., X.-Y. Yang, S. -S. Zhang. 2008. *Trends Analytical Chem.*, 27, 543.
- Lin C. J., S.L. Lo, Y. H. Liou. 2005. *Chemosphere* 59 : 1299-1307.
- Liu J. , Z. Guo F. Meng, T. Luo, M. Li, J. Liu. 2009. *Nanotechnology* 20, 125501.
- Liu, X., Z. Feng, F. Zhang, S. Zhang, H.E. Xu-Sheng. 2006. *Agricultural Sci. China*, 5, 700.
- Lu, J., Y. Li, X. Yan, B. Shi, D. Wang, H. Tang. 2008. *Colloid Surfaces a: Physicochem. Eng. Aspects*, 347, 90.
- Mahmoodi, N. M., M. Arami, N. Y. Limaee, K. Gharanjig. 2007. *J. Hazar. Materials*, 145, 65.
- Masciangioli, T., W.X. Zhang. 2003. *Environ. Sci. Technol.*, 1, 102.
- Mita, D.G., A. Attanasio, F. Arduini, N. Diano, V. Grano, U. Bencivenga, S. Rossi, A. Amine, D. Moscone. 1997. *Biosensors Bioelectronics*, 23, 60.
- Munteanu, F., A. Lindgren, J. Emneus, L. Gorton, T. Ruzgas, A. Ciucu, E. Csorregi. 1998. *Analytical Chem.*, 70, 2596.
- Orozlan, P., G.L. Duveneck, M. Ehrat, H.M. Widmer. 1993. *Sensors Actuators*, 11, 301.
- Pareek, V., A.A. Adesina. 2003. *Handbook of photochemistry and photobiology*, vol 1. American Scientific Publishers, Stevenson.
- Pirvutiu, S, I. Surugiu, A. Ciucu, V. Magearu, B. Danielsson. 2001. *Analyst*, 126, 1612.
- Prevot, A.B., D. Fabbri, E. Pramauro, A.M. Rubio, M. de la Guardia. 2001. *Chemosphere*, 44, 249.
- Ray, P.C., G.K. Darbha, A. Ray. 2008. *Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*, NSTI-Nanotech, Nanotechnology, 2, 81.
- Rivero-Huguet, M., W.D. Marshall. 2009. *J. Hazar. Materials*, 169, 1081.
- Roger, K.R., Wang, Y., Mulchandani, A., Mulchandani, P., Chen, W. 1999. *Biotechnol. Progr.* 15, 517.
- Rotiroti, L., L. De Stefano, I. Rendina, L. Moretti, A. M. Rossi, A. Piccolo. 2005. *Biosensors Bioelectronics*, 20, 2136.
- Schofield, P., A.N. Pell, D.O. Krause. 1997. *Appl. Environ. Microbiol.* 63, 1143.
- Sayles, G.D., G. You, M. Wang, M.J. Kupferle. 1997. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 3448.
- Tang L., G. M. Zeng, G. Shen, Y. P. Li, Y. Zhang, D. L. Huang. 2008. *Environ. Sci. Technol.* 2008, 42: 1207-1212.
- Tomalia, D.A. 2008. National Science Fundation. *Final workshop report*, 1-156. http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/GC_Charact08_Tomalia_nsf9_29_08.pdf
- Tomalia, D.A. 2009. *J. Nanoparticles Rest.*, 11, 1251.
- Tratnyek, P.G., R.L. Johnson. 2006. *Nanotoday*, 1, 44.

- Ulrich, C., I. Mewis, A. Goswami. 2005. Annals Technical Issue of State Agricultural Technologists Service Assoc. ISSN 097i-975X. P 1-18.
- Wang, J.S., K. Chiu. 2009. *Chemosphere*, 75, 629.
- Wang, L., L. Wang, T. Xia, L. Dong, G. Bian, H. 2004. *Chem. Anal. Sci.*, 20, 1013.
- Zhang, W., C. B. Wang, H.L. Lien. 1998. *Catalysis Today*, 40, 387.
- Zhang, F., R. Wang, Q. Xiao, Y. Wang y J. Zhang. 2006. *Nanoscience*, 11, 18.
- Zhenzhong, L., H. Deng, J. Zhan. 2007. *Chinese J. Popular Resources Environ.*, 5, 23.

Diseño genético de aceros endurecidos por nanoprecipitados

PEDRO E. J. RIVERA DÍAZ DEL CASTILLO*

RESUMEN. Los nanomateriales estructurales más exitosos de la historia son las aleaciones metálicas utilizadas para aplicaciones ingenieriles. Las nanoestructuras responsables de sus excepcionales propiedades mecánicas son, por ejemplo, precipitados formados en una solución sólida en aleaciones de aluminio, comúnmente utilizadas en el fuselaje de aviones comerciales; otras nanoestructuras incluyen placas de diversas fases (por ejemplo, austenita y ferrita en aceros nanobainíticos), ahora utilizados en la industria militar; y aleaciones deformadas de manera severa en las que se forman nanocristales. El presente artículo se enfoca en aleaciones endurecidas por nanoprecipitados e, inspirado por las leyes de la genética, se utiliza la expresión matemática de dichas leyes para concebir nuevas aleaciones. El método es utilizado para desarrollar nuevos materiales para trenes de aterrizaje resistentes a la corrosión, y se demuestra que la combinación de propiedades es del mayor nivel hasta ahora encontrado.

PALABRAS CLAVE: nanoprecipitados, nanomateriales estructurales, algoritmos genéticos, diseño de aleaciones.

ABSTRACT. The most successful structural nano-materials in history are metal alloys used in engineering applications. The nanostructures responsible for their exceptional mechanical properties are for example, precipitates formed in a solid solution in aluminum alloys commonly used in commercial aircraft fuselage; other nanostructures include plates of different phase (e.g. austenite and ferrite in steels nano-bainitics), now used in military industry; and severely deformed alloys in which nanocrystals are formed. This article focuses on alloys hardened by nanoprecipitates and, inspired by the laws of genetics, the mathematical expression of these laws is used to develop new alloys. The method is used to develop new materials for corrosion resistant aircraft landing gear, and it is shown that the combination of properties is of the highest level found so far.

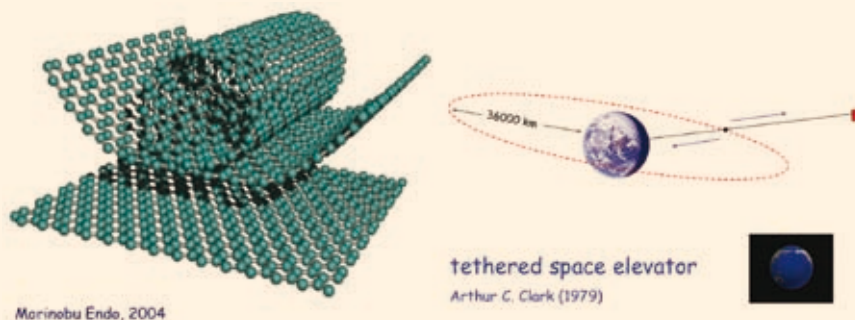
KEYWORDS: nanoprecipitates, structural nanomaterials, genetic algorithms, alloy design.

Actualmente, existe la tendencia de explorar estructuras de diversa índole a nivel nanométrico. Muchas de ellas han sido fabricadas y caracterizadas, y también han sido sujetas a pruebas mecánicas. Las propiedades que muestran son extraordinarias, inspirando historias que, en lugar de parecer el resultado del razonamiento científico y sistemático, más bien podrían haber sido extraídas de una película de ciencia ficción. Por ejemplo, se ha sugerido que sería posible construir un elevador de nanotubos de carbono que nos transportara al espacio exterior (véase la figura 1). Ésta y otras sugerencias han suscitado un auge en el estudio de ciertos fenómenos que, si bien son de gran interés científico, todavía están lejos de alcanzar las aplicaciones tecnológicas imaginadas.

Como reacción a las expresiones de optimismo, algunos científicos han argumentado la inconsistencia de extrapolar las propiedades de estructuras de escalas na-

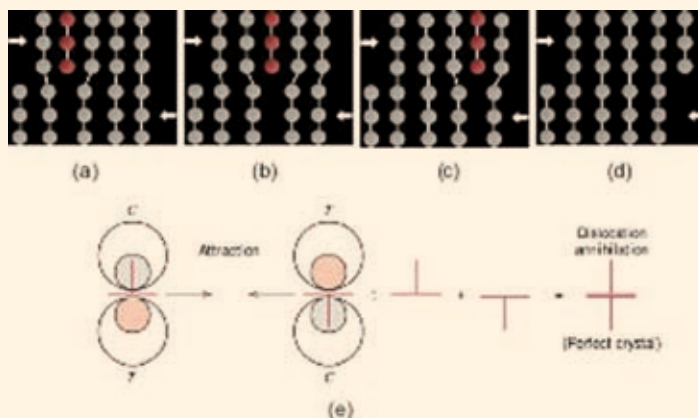
* Departamento de Ciencia de Materiales y Metalurgia, Universidad de Cambridge. Pembroke Street, CB2 3QZ Cambridge, Reino Unido.

FIGURA 1. Ilustración de un nanotubo de carbono (izquierda) y su posible utilización para fabricar un elevador de 36 mil km dirigido hacia el espacio exterior [1,2] (derecha).



nométricas al mundo macroscópico [3,4,5]. Se ha señalado que, al incrementar el tamaño de las nanoestructuras, la presencia y la interacción de defectos en la estructura cristalina adquieren importancia [3]. En efecto, la resistencia mecánica de los materiales depende de la formación e interacción de defectos tales como dislocaciones (véase la figura 2), sitios vacantes (posiciones atómicas no ocupadas en una red cristalina), la formación de fallas de apilamiento (en secuencias de planos cristalinos) y maclas (defectos alrededor de los cuales las posiciones de atómicas son reflejadas como en un espejo), principalmente. La *operación* de dichos defectos, es decir, su movimiento e interacción con otros defectos, ocurre en espacios de cientos de nanómetros. Por ejemplo, la resistencia a la cedencia (o deformación no-elástica) de metales a temperatura ambiente depende principalmente de la formación de dislocaciones en su nanoestructura y de la interacción entre ellas. Dichos defectos consisten en irregularidades de la estructura cristalina (véase la figura 2a) que se desplazan al aplicar un esfuerzo (véanse las figuras 2a-d) y que causan distorsiones nanométricas en ésta

FIGURA 2. Ilustración de una dislocación y su movimiento (a)-(d), así como de los campos de deformación alrededor de ella y de su ausencia en un cristal perfecto (e).

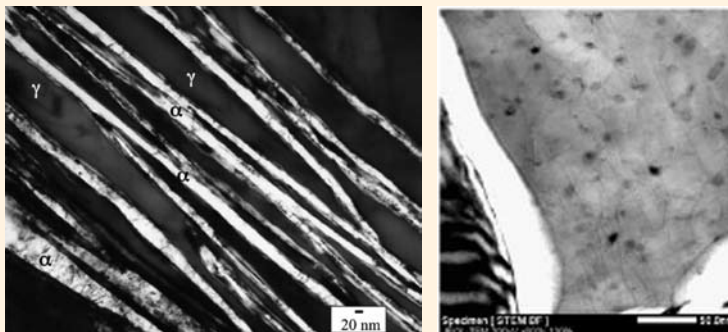


estructura de un tamaño aproximado de 50-100 nm (véase la figura 2e). Un cristal perfecto es aquel que no contiene este tipo de distorsiones (Figura 2e). Ahora bien, al fabricar una estructura a nivel nanométrico, las dislocaciones y los defectos no disponen de *grados de libertad* para su movimiento. Los grados de libertad se expresan termodinámicamente a través del concepto de entropía [6,7]. Debido a la existencia de una estructura cristalina, los grados de libertad (esto es, el número de caminos que los defectos pueden seguir en su movimiento) disminuyen con el tamaño de la muestra deformada [3,8,9]. Si un nanotubo de carbono tiene un diámetro de decenas de nanómetros, los grados de libertad en la formación, movimiento e interacción de las dislocaciones serán muy reducidos, y el nanotubo no se deformará. Su resistencia a la cedencia será enorme, pero no se deformará. Esto quiere decir que es imposible fabricarlo, pues no se le puede dar forma, y se vuelve completamente impráctico y tecnológicamente irrelevante.

ACEROS CON NANOESTRUCTURAS DE PRECIPITADOS

La gran resistencia de las estructuras a nivel nanométrico no es un descubrimiento reciente. Durante los años cincuenta, se reportaron tubos capilares monocristalinos de hierro con resistencia a la cedencia por encima de 10 GPa. El problema es cuando dichas estructuras de tamaño reducido y, efectivamente, de una o dos dimensiones, se tratan de fabricar en tres dimensiones. Las propiedades mecánicas se reducen de manera drástica al incrementarse las posibilidades de interacción de las dislocaciones, entre ellas, con vacancias, fronteras de grano y otros muchos defectos. El reconocimiento de estos hechos, y la manipulación cuidadosa de los defectos cristalinos, nos da la posibilidad de concebir materiales útiles para la sociedad, que pueden ser fabricados a escalas mayores que las del laboratorio. Un ejemplo interesante de dichos materiales son los aceros nanobainíticos [10,11]. Dichas aleaciones consisten de elegantes estructuras de ferrita (α) y de austenita (γ) (véase la figura 3) cuyas fracciones de volumen, forma y tamaño han sido cuidadosamente controladas. La austenita tiene un alto contenido de carbono que le confiere resistencia, mientras que la ferrita se encuentra li-

FIGURA 3. Ejemplos de aceros nanoestructurados: (a) imagen de microscopio electrónico de transmisión de un acero de Fe–0.98C–1.46Si–1.89Mn–0.26Mo–1.26Cr–0.09V [3,13]; (b) acero martensítico de bajo contenido de carbono.



bre de carbono lo que le da ductilidad a la aleación y permite deformarla. La resistencia así obtenida es superior a 2 GPa, su ductilidad es superior a 20%, y se puede utilizar en componentes estructurales de longitudes de metros. El autor no conoce ninguna estructura basada en nanotubos de carbono que posea propiedades mecánicas comparables, ni de dimensiones superiores a 1 o 2 milímetros en las tres dimensiones.

A diferencia de lo que mucha gente cree, los materiales nanoestructurados han sido utilizados y fabricados industrialmente desde hace aproximadamente 70 años. Por ejemplo, las aleaciones de aluminio utilizadas en los aviones a partir de los años treinta contienen estructuras de nanoprecipitados con diámetros de 5 a 30 nm y longitudes de hasta 100 nm, y fueron reportadas desde los años cincuenta [12]. Estas aleaciones de Al con Cu, Mn y Mg, poseen una alta densidad de precipitados con distancias entre ellos menores a 100 nm. La diferencia es que dichas aleaciones sí se pueden fabricar en grandes volúmenes y han mostrado ser útiles para la sociedad.

Otro tipo de estructuras que ofrece una combinación de propiedades mecánicas extraordinarias, además de la posibilidad de producir componentes de gran volumen y alta confiabilidad, son aquellas basadas en nanoprecipitados, por ejemplo, los martensíticos. La martensita es una estructura formada bajo temple a altas temperaturas. Su formación se acompaña por la creación de una red de dislocaciones de alta densidad. Dichas dislocaciones proveen condiciones energéticas favorables para la formación de precipitados a distancias que van de 10 a 100 nm de distancia entre ellos. Los precipitados tienen la peculiaridad de ofrecer obstáculos al desplazamiento de las dislocaciones, permitiendo a la vez tanto la deformación del material como su endurecimiento. Un ejemplo de dichos precipitados se muestra en la figura 3b, en donde una alta densidad de partículas de $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ se forma bajo envejecimiento (*i.e.* manteniendo la aleación a alta temperatura por un tiempo considerable) en una aleación de $\text{Fe—11.9Mn—0.0101C—2.06Ni—1.12Mo—1.09Ti—0.057Si—0.116Al}$ a $500\text{ }^\circ\text{C}$ ¹³.

El empleo del fenómeno de la precipitación ha ofrecido grandes oportunidades para desarrollar aleaciones con propiedades extraordinarias. Algunas de sus aplicaciones incluyen el fuselaje de los aviones (aleaciones de aluminio), el tren de aterrizaje (acero de alto contenido de carbono con recubrimiento antioxidante), la flecha de las turbinas de aviones y tanques, así como la tubería y los tanques de reactores atómicos (aceros inoxidables). A pesar de que dichas aleaciones *ya existen*, sería posible pensar en *nuevas aleaciones* si fuéramos capaces de predecir qué precipitados se forman en función de la temperatura del tratamiento térmico y la composición de la aleación. En efecto, esto es ahora posible con la ayuda de la termodinámica computacional y la teoría cinética. A partir de los años setenta del siglo XX, se han desarrollado bases termoquímicas y modelos matemáticos capaces de predecir, a través de su energía de formación, qué precipitados se forman en una matriz supersaturada de soluto; también es posible predecir la composición, potenciales químicos y fracción de volumen de dichas fases [14]. El problema es que, en las aleaciones industriales, la composición es muy compleja. Por ejemplo, un acero inoxidable de resistencia mecánica superior a 1.5 GPa típicamente posee 10 elementos o más en la aleación: Fe, C, Cr, Ni, Ti, Mo, Al, Cu, Co, Mn y Si. Cada uno de estos elementos tiene una finalidad específica y los efectos de combinarlos no son triviales. Variaciones en el contenido de carbono del 0.01 al 0.41 % del peso (%pe) producen cambios enormes en la energía de formación de algunos precipitados; similarmente, variaciones en el contenido de Cr del 12 al 20 %pe alteran en grado extremo la energía de formación de diversas fases. Suponiendo que podemos variar la concentración de cada uno de los elementos en 11

valores, e.g. 0.01, 0.05,...,0.41 %pe C, el número de posibles aleaciones es de 11 [10], sin incluir las distintos tratamientos térmicos posibles. En resumen, hay trillones de posibilidades de aleaciones y tratamientos térmicos. Anteriormente, los diseñadores de aleaciones encontraban nuevas formulaciones combinando la intuición con el conocimiento metalúrgico y un poco de suerte. Sin embargo, la intuición difícilmente puede indicar cómo cambia la energía de formación de los precipitados de $Ni_3(Ti,Al)$ si se incrementa la composición del Ti combinado con el Ni, y se reduce el contenido de C, en combinación con la temperatura del tratamiento térmico. Ésas son opciones que se encuentran dentro de las 10 [10] que hemos discutido; sin embargo, hacer cálculos para todos los casos es muy tardado. Debido a esto, el autor y sus colaboradores han propuesto utilizar algoritmos genéticos [15].

MODELADO FÍSICO Y GENÉTICO

El primer paso para diseñar estructuras de precipitados a la medida es reconocer las variables físicas que se van a manipular y que permiten su control. Dichas variables son: el tamaño de las partículas (radio r) y su fracción de volumen (f) (véase la figura 4). Existen relaciones elementales entre estas variables y el endurecimiento de los precipitados. En la ecuación

$$\sigma = \sigma_p^{\text{corte}} / r \alpha f^{1/2} r^{-1/2} \quad (1)$$

donde σ_p^{corte} representa la contribución al endurecimiento cuando los precipitados tienen un diámetro superior a aproximadamente 5 - 30 nm. Por otro lado, $\sigma_p^{\text{desvío}}$, resulta de precipitados de menor tamaño, que quedan rodeados por dislocaciones las cuales *desvían* su trayectoria al pasar alrededor de estos precipitados. El factor s fue propuesto por el autor y colaboradores para describir dicho proceso de endurecimiento por precipitación a nivel de unos cuantos nanómetros. El uso de la ecuación (1) requiere del cálculo de la fracción del volumen del precipitado en equilibrio y de la estimación del radio. En principio, r depende de la duración del tratamiento térmico, pero los precipitados que diseñamos son tan pequeños que se puede suponer que su tamaño es cercano a su radio de nucleación. Debido a ello, empleamos la teoría clásica de nucleación para estimar dicho radio mediante la fórmula $r = 2\gamma/\Delta G$, donde γ es la energía interfacial por unidad de área y ΔG es la energía de formación de los precipitados, la cual depende de la composición del acero y de la temperatura.

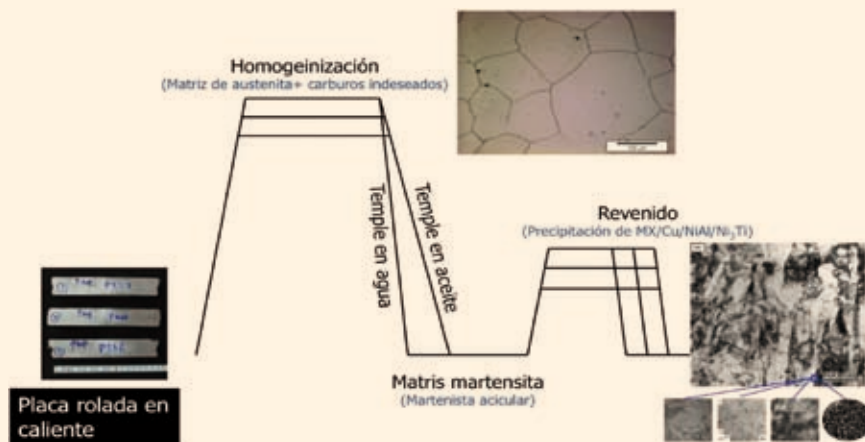
El número de opciones para el endurecimiento es enorme. En el ejercicio de diseño de aleación que realizamos, consideramos la concepción aceros inoxidable más resistentes hasta ahora producida. Dichos aceros requieren un tratamiento térmico en el que primero se homogeniza la aleación a altas temperaturas (típicamente superiores a 900 °C), seguido por temple (enfriamiento rápido, tras el cual se forma martensita) para luego revenir (mantener la muestra) a temperaturas entre 450 y 550 °C, proceso en el cual se forman los nanoprecipitados. La secuencia de procesos es mostrada en la figura 5.

Dado que el número de opciones es superior a 10^{12} , y que cada cálculo termodinámico toma varios segundos, realizar el cálculo para todas las aleaciones posibles tomaría varios millones de años. Aun utilizando las computadoras más sofisticadas, rápidas y avanzadas disponibles en la actualidad el cálculo es imposible. Debido a ello

FIGURA 4. Transición entre mecanismos de corte desvío de dislocaciones y sus efectos cuantitativos en el endurecimiento por precipitación.



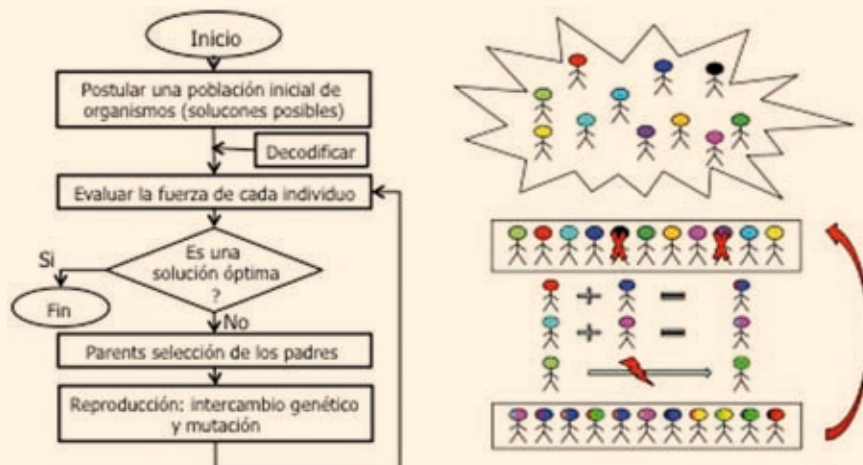
FIGURA 5. Secuencia de procesos modelados y empleados en la fabricación de aleaciones experimentales.



se requiere seguir un procedimiento capaz de acortar el tiempo requerido para los cálculos. Se eligió utilizar un algoritmo genético.

El algoritmo genético se basa en principios evolutivos. Se postula que la mejor solución es aquella que cumple de mejor forma con un criterio. En este caso es literalmente la supervivencia de los más fuertes. En efecto, las aleaciones más fuertes (de acuerdo con la ecuación 1) son las que son escogidas por el algoritmo como las mejores. La descripción del proceso se ilustra en la figura 6.

FIGURA 6. Pasos a seguir en la selección de los organismos (aleaciones) que resultan genéticamente más fuertes.



- (1) Primero se postula una población inicial de aleaciones y tratamientos térmicos, los cuales son expresados (codificados) en forma binaria para su ulterior consideración en el cómputo. (Por razones que escapan al alcance de este artículo, se establece que dicha población debe expresarse en código binario.) Éstas son las “soluciones posibles” con las que se inicia el cálculo.
- (2) Se decodifica la población de aleaciones y se calcula la fuerza de cada individuo a través de la ecuación (1).
- (3) Se comparan las fuerzas de los individuos obtenidas y se decide si la solución es muy buena o no. Por ejemplo, si el factor de endurecimiento es de 100 MPa, la solución es muy mala, si es de 2.5 GPa es extraordinariamente buena.
- (4) Los padres se aparean (reproducen) tomando la información genética de cada aleación e intercambiándola. Se permiten mutaciones, las cuales ayudan a asegurar que un máximo absoluto de la función se encuentra tras múltiples iteraciones.

Los pasos 2 a 4 descritos anteriormente se ilustran en la figura 7. El autor y colaboradores han aplicado este método para diseñar aceros inoxidables bajo tres diferentes esquemas: aceros inoxidables endurecidos por nanoprecipitados de (a) NiTi, (b) nanopartículas de Cu, CuNi, (c) Carburos tipo MX, (d) Carburos tipo MX con un alto contenido de cobalto (CarCo). En la figura 8, se muestran aleaciones diseñadas bajo dos principios: excluyendo los efectos de la formación de precipitados a alta temperatura (NiTi, CuNi, Car y CarCo), y aquellas que incluyen dichos efectos (NiTi₂, CuNi₂, Car₂ y CarCo₂). Las aleaciones son comparadas con los aceros más resistentes que existen en la actualidad. Nuestros resultados muestran de manera clara que el algoritmo presentado es capaz de sugerir aleaciones y tratamientos térmicos en la frontera de lo que se conoce en la actualidad. De hecho, varias aleaciones que superan cualquier marca registrada en la actualidad han sido producidas como resultado de nuestro trabajo.

FIGURA 7. Representación esquemática de los pasos de (a) codificación de varios individuos y su decodificación, seguida por el cálculo de sus parámetros de fuerza (ecuación 1); (c) el apareamiento de individuos y, (d) finalmente, su posible mutación.

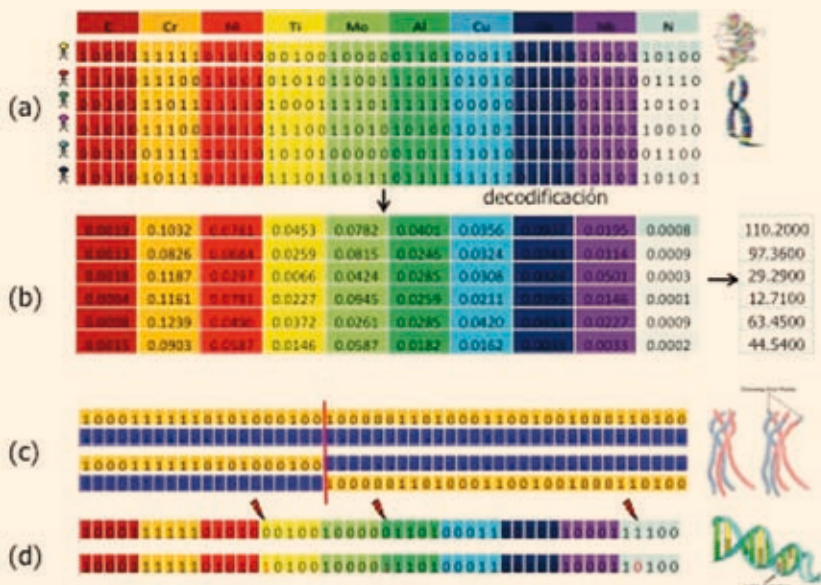


FIGURA 8. Comparación de la resistencia y formabilidad (elongación) de las aleaciones diseñadas genéticamente y las aleaciones con las mejores propiedades mecánicas reportadas en la literatura.

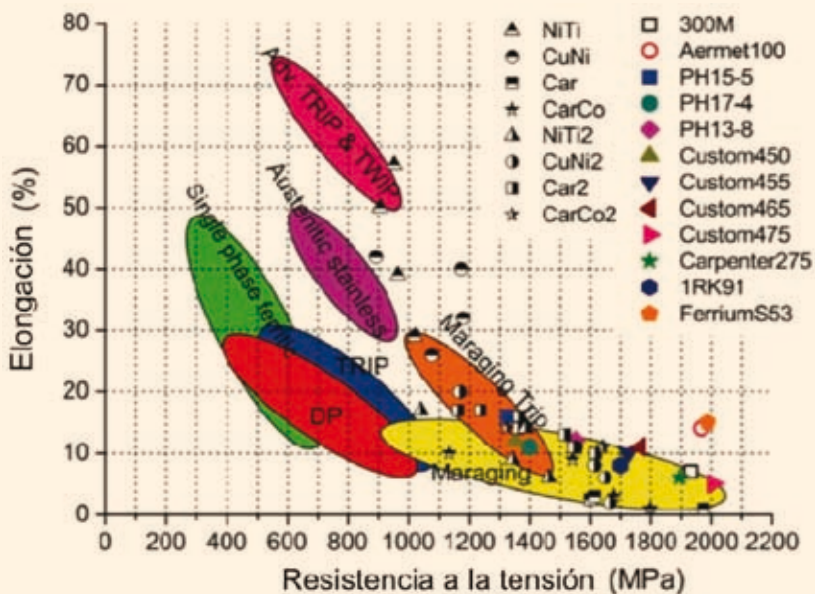
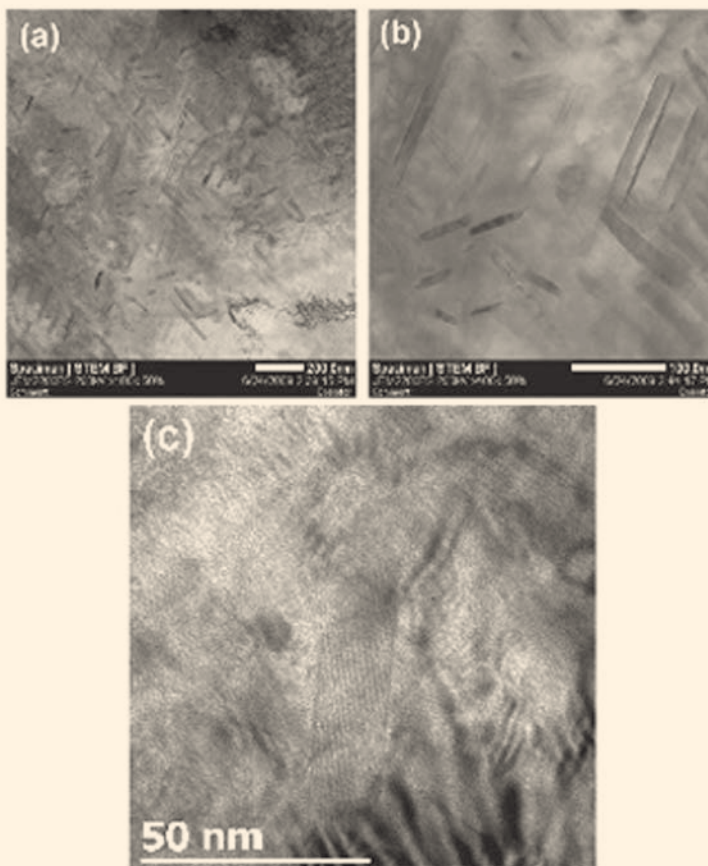


FIGURA 9. Micrografías de la aleación NiTi2 tras envejecimiento a 500 °C por 24 horas. (a-b) Imágenes de barrido en microscopio electrónico de transmisión y (c) de microscopio de alta resolución de transmisión.



Como prueba adicional de la utilidad del método presentado aquí, en la figura 9 se muestran algunas de las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de alta resolución de la aleación NiTi₂. Las imágenes muestran que el tamaño y fracción de volumen de los nanoprecipitados corresponden a aquéllos diseñados y utilizados en la ecuación (1).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El trabajo presentado muestra que la combinación de algoritmos genéticos con cálculos termodinámicos permite diseñar aleaciones con dispersiones de nanopartículas. A pesar de la simplicidad del modelo, se han diseñado nuevas aleaciones de composiciones completamente diferentes y nuevos tratamientos térmicos, los cuales han

mostrado propiedades equivalentes y en algunos casos mejores a las de las aleaciones comerciales de mejores propiedades mecánicas.

El procedimiento presentado aquí permite su utilización en otros tipos de familias de aleaciones. El autor actualmente utiliza dicho método para concebir nuevas aleaciones de aluminio de la serie 7 mil, que son utilizadas como partes estructurales y del fuselaje de aviones comerciales. También se contempla el rediseño de nuevas aleaciones de titanio, ya que el procedimiento permite la concepción de nuevos grados a bajo costo y tiempo de desarrollo. El trabajo en dichas aleaciones es apoyado económicamente por proveedores de Airbus como Aleris, o por la Agencia Espacial Europea (ESA).

REFERENCIAS

- [1] M. Endo, T. Hayashi, Y. A. Kim, M. Terrones, M. S. Dresselhaus. 2004. "Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 362, 2223-2238.
- [2] B. C. Edwards. 2000. "Design and development of a space elevator", *Acta Astronaut.*, 47, 735-744.
- [3] H. K. D. H. Bhadeshia. 2005. "Large chunks of very strong steel", *Mater. Sci. Tech.*, 21, 1293-1302.
- [4] R. S. Ruoff. 2006. "Time, temperature, and load: the flaws of carbon nanotubes", *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 103, 6779-6780.
- [5] R. S. Pugno. 2007. "Space elevator: out of order?", *Nano Today*. 2, 44-47.
- [6] M. Huang, P. E. J. Rivera Díaz del Castillo, S. van der Zwaag. 2008. "Irreversible thermodynamics modelling of plastic deformation of Metals", *Materials Science and Technology*, 24, 495-500.
- [7] M. Huang, P. E. J. Rivera-Díaz-del-Castillo, O. Bouaziz, S. van der Zwaag. 2009. "Modelling the steady state deformation stress under various deformation conditions using a single irreversible thermodynamics based formulation", *Acta Materialia*, 57, 3431-3438.
- [8] M. Huang, P. E. J. Rivera Díaz del Castillo, S. van der Zwaag. 2008. "Modelling Strength and Ductility of Ultrafine Grained BCC and FCC Alloys Using Irreversible Thermodynamics", *Materials Science and Technology*, 25, 833-839.
- [9] M. Huang, P. E. J. Rivera-Díaz-del-Castillo, O. Bouaziz, S. van der Zwaag. 2009. "Modelling the strength of ultrafine-grained and nanocrystalline fcc metals", 61, 1113-1116.
- [10] F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia. 2004. "Very strong bainite", 8, 251-257.
- [11] H. K. D. H. Bhadeshia, "Nanostructured bainite", *Proce. Roy. Soc. A* (aceptado).
- [12] J. M. Silcock, T. J. Heal, H. K. Hardy. 1954. "Structural ageing characteristics of binary aluminium copper alloys", *Journal of the Institute of Materials*, 82, 239-248.
- [13] D. Raabe, D. Ponge, O. Dimitreva, B. Sander 2009. "Nanoprecipitate-hardened 1.5 GPa steels with unexpected high ductility", 60, 1141-1144.
- [14] Thermo-calc, Stockholm Technology Park, SE-114 19 Sweden.
- [15] W Xu, PEJ Rivera-Díaz-del-Castillo, S van der Zwaag. 2008. "Designing nanoprecipitation strengthened UHS stainless steels combining genetic algorithms and thermodynamics", *Computational Materials Science*, 44, 678-689.

La implantación de la nanotecnología en España: muchas luces y algunas sombras

PEDRO A. SERENA*

RESUMEN. Este artículo describe las principales acciones realizadas en España para llevar a cabo la implantación de la nanociencia y la nanotecnología durante la última década en diversos frentes: investigación, transferencia, divulgación, formación, etc. En particular, estas actividades se encuadran dentro del contexto de las acciones estratégicas que el Ministerio de Ciencia e Innovación ha impulsado desde el año 2004. Se describen algunos actos exitosos como la puesta en marcha de proyectos de investigación focalizada, el fomento de consorcios industriales, la formación de una gran red de investigadores, o la construcción de centros de investigación. Se indican también algunos problemas detectados causados por cierta falta de coordinación entre todos los actores involucrados.

PALABRAS CLAVE: política científica, acciones estratégicas, implementación de nanotecnología, Plan Nacional de Investigación.

ABSTRACT. This article describes the main actions taken by Spain in order to achieve the implantation of nanoscience and nanotechnology during the last decade in diverse fronts: research, transfer, transmission, training, etc. In particular this actions are framed within the context of the strategic actions that the Ministry of Science and Innovation had carried out since 2004. The text describes some successful actions such as the launch of focalized research projects; the stimulus to industrial consortiums: the training of a vast network of researchers; or the construction of research centers. Some problems are also identified, mainly as a result of the existence of some degree of lack of coordination among the actors involved.

KEY WORDS: scientific policy, strategic actions, nanotechnology implementation, National Research Plan.

INTRODUCCIÓN: UN BREVE RESUMEN DE 50 AÑOS DE HISTORIA

Ha transcurrido casi medio siglo desde el visionario discurso de R. Feynman (Feynman, 1960) que permitió soñar con dominar la materia a escala nanométrica, siendo el antecedente de lo que hoy llamamos nanotecnología. La llamada ley de Moore (Moore, 1965) se ha venido cumpliendo sin grandes problemas durante más de 40 años y ya se habla con toda familiaridad de las tecnologías de 32 nm para las generaciones de procesadores que tendremos en nuestras casas y oficinas a finales de este año. El propio término “nanotecnología” ha cumplido ya 35 años (Taniguchi, 1974). Nos separan más de dos décadas de la invención de los primeros microscopios de barrido, que nos han permitido desde entonces rastrear el nanomundo (Binnig, 1987). También han alcanzado la mayoría de edad las arriesgadas ideas de E. Drexler, que propuso la fabricación de materiales y dispositivos mediante técnicas ascendentes (*bottom-up*) usando minúsculos ensambladores de átomos y moléculas (Drexler, 1986). Los nanotubos

* Investigador del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). En la actualidad es miembro del Consejo Científico Asesor del CSIC, y del Consejo Asesor Científico del Parque Científico de Madrid. pedro.serena@icmm.csic.es.

de carbono se descubrieron un poco antes del nacimiento de los estudiantes que ahora ingresan en nuestras universidades (Iijima, 1991). Es cierto: la nanotecnología ha madurado en un lento proceso y ya se encuentra plenamente insertada en el sistema académico. Quizás es más correcto decir que la “nanociencia” es la rama científica que se ha estado desarrollando durante estas tres últimas décadas, pero el término nanotecnología es con el que solemos designar tanto los aspectos básicos como los aplicados de la investigación a escala nanométrica.

La inserción de la nanotecnología ha sido más pronunciada a lo largo de la última década, ya que los gobiernos de los países más avanzados del mundo han realizado una apuesta decidida por invertir grandes recursos financieros para fomentar la investigación en nanotecnología. Hay multitud de informes que contabilizan las grandes sumas de capital que la nanotecnología ha logrado atraer (Roco, 2005; Comisión Europea, 2005; Correia, 2007; Delgado, 2008; Delgado, 2009; Kleike 2009). Sin embargo, una gran parte de la inversión efectuada hasta la fecha tiene su origen en los fondos públicos, como suele ocurrir con las ramas más emergentes del saber. Estos recursos se han utilizado de forma similar en casi todos los países: para financiar proyectos multidisciplinarios, la adquisición de costosos equipamientos, y la construcción de centros específicamente orientados a la investigación en nanotecnología.

¿Qué fuerza empuja a los gobiernos de las naciones más poderosas para mantener un ritmo creciente de inversiones en nanotecnología? No cabe duda que detrás de estas cantidades astronómicas existe la convicción entre los responsables políticos de que los desarrollos y avances de la nanotecnología van a constituir la base para la próxima revolución tecnológica. Una revolución tecnológica que, en convergencia con los avances en tecnologías de las comunicaciones, en biotecnología y en el ámbito de las neurociencias, puede suponer el tránsito hacia un nuevo modelo económico y social (Roco, 2002; Comisión Europea, 2004 A; Fontela, 2006; Delgado, 2008). Dicha revolución supondrá una gran oportunidad de negocio para las empresas de aquellos países que hayan tenido la capacidad de vislumbrar ese revolucionario futuro. Ahí reside, en parte, la fuerza que sigue impulsando la inversión en nanotecnología.

La percepción de la existencia de un gran negocio ha propiciado que el sector privado vaya aumentando su peso en la financiación de la nanotecnología. Se estima que la inversión conjunta público-privada en nanotecnología ha sido superior a los 18,200 millones de dólares en el año 2008 (Lux Research, 2008). Sin embargo, no todas las iniciativas para introducir las nanotecnologías en la industria van a generar beneficios de forma inmediata, lo que ha sido utilizado por algunos sectores para hablar del fracaso de las expectativas creadas. Además, la actual crisis económica, de carácter financiero, ha ralentizado las inversiones tanto públicas como privadas, por lo que en estos momentos existe cierta incertidumbre sobre el crecimiento del sector. A pesar de esta situación, las cifras del negocio vinculado alcanzaron en 2007 un volumen cercano a los 147 mil millones de dólares según la compañía Lux Research (Lux Research, 2008). Esta misma compañía mantiene la previsión de que este mercado alcanzará la increíble cifra de 3.1 billones de dólares en el año 2015. Es decir, en ese momento cada habitante del planeta acaparará una cuota del nanomercado de más de 300 dólares. Sin embargo, es fácil predecir que este negocio estará muy desigualmente repartido pues los habitantes de las economías más desarrolladas (EUA, Japón, la Unión Europea, Canadá, etc.) serán los grandes impulsores, clientes y beneficiarios del mismo.

Las ganancias que se esperan son suculentas, pero existen ciertos condicionantes que conviene tener en cuenta para que ese mercado se desarrolle siguiendo las

predicciones de los expertos. Estos condicionantes de mercado tienen que ver con la percepción de la nanotecnología por parte de la población. El desarrollo de bienes de consumo o servicios basados en la nanotecnología se encontrará en su camino con problemas relacionados con aspectos éticos, medioambientales, sanitarios, de seguridad laboral, legales, etc. (Fielder, 1994; Roco, 2001; Sweeney, 2003; Baird, 2004; Shatkin, 2008; Delgado, 2008) La Comisión Europea, los gobiernos de EUA, de Japón, etc., están incluyendo entre sus prioridades estudios sobre toxicología, impacto ambiental, consecuencias éticas, percepción social, etc., de las nanotecnologías para lograr que éstas tengan un aterrizaje “suave y sin riesgos” en la sociedad, evitando una percepción generalizada negativa que pudiera bloquear el desarrollo e implantación de las mismas.

LA IMPLANTACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ESPAÑA

Durante los últimos treinta años, España ha sufrido una gran transformación económica, cultural y social, situándose entre las diez economías más importantes del mundo (Banco Mundial, 2007). Este cambio ha sido fruto de diversos factores pero, sin duda alguna, el más importante ha sido su incorporación a la Unión Europea, que permitió, entre otras cosas, acceder a fondos estructurales y de cohesión con los que sufragar costosas infraestructuras. Pero el cambio experimentado también se debe a cuestiones más sutiles, como la adopción de nuevos modelos de gestión y organización o la libre circulación de ciudadanos y bienes entre países.

El ámbito científico también se ha beneficiado de las inversiones en infraestructuras, aunque quizás un factor que debe tenerse en cuenta es la existencia de una masa crítica de investigadores (con formación complementaria en el extranjero). Como consecuencia de este desarrollo científico, en estos momentos, el 3.1% de los artículos publicados en revistas internacionales tiene algún autor de una institución española, lo que nos sitúa en la novena posición mundial por número de artículos y en décima posición en cuanto al número total de citas (ISI Thomson, 2008). Todo este proceso de cambio se ha producido en un contexto de fuerte crecimiento económico y gracias a un paulatino cambio de actitud en los dirigentes políticos. Hoy día no existe ningún partido político, ni gobierno (local, regional o nacional) que no manifiesten su apoyo al aumento de la inversión en I+D como elemento imprescindible para convertirnos en una sociedad basada en el conocimiento, propuesta que está en el horizonte de las actuaciones a medio-largo plazo de la Unión Europea.

En España, la nanotecnología se ha desarrollado siguiendo los mismos patrones que las demás ramas científicas, aunque con algunas particularidades que condicionan el panorama actual (Correia, 2006; Correia, 2008). Para poder entender esta evolución vamos a diferenciar tres periodos diferentes.

1980-2000. Durante esta fase, los primeros desarrollos en nanociencia se producen en los laboratorios de universidades y centros de investigación, propiciando la formación de nuevos expertos que son los que en estos momentos pilotan la investigación en nanotecnología. Esta fase expansiva se produce en un entorno sociopolítico que favorece las inversiones en formación (agresiva política de becas) y la creación de numerosos grupos de investigación. Como hecho relevante se debe mencionar que el grupo de Nuevas Microscopías de la Universidad Autónoma de Madrid fue el segundo grupo del mundo en poseer un microscopio de efecto túnel (STM), equipo que fue cedido por H. Rohrer, uno de los inventores de este fascinante instrumento. Este he-

cho dio lugar a la aparición de toda una generación de científicos que han hecho de este campus uno de los más importantes del mundo en el uso de las técnicas de microscopía local (SPM). Sin embargo, durante esta etapa no existen indicios de coordinación entre los grupos y las administraciones públicas que ignoraban los desarrollos en nanotecnología.

2000-2004. A finales de los años 1990 surge en EUA la Iniciativa Nacional de Nanotecnología (Kleike, 2009) que se convirtió en referente en otros países. De esta forma, comienza una etapa en la que los investigadores españoles se organizan alrededor de redes como la desaparecida Nanociencia (Serena, 2005) o la Red NanoSpain (NanoSpain, 2009), que continúa ejerciendo de aglutinante de la comunidad científica. Durante esta etapa, surgen diversas iniciativas que contribuyeron tanto a conectar los grupos de investigación entre sí como a dar proyección internacional a dicha actividad. Se debe destacar en este punto la puesta en marcha de la serie de conferencias Trends in Nanotechnology (TNT, 2009). Durante éstas, las redes de investigación comienzan a ejercer cierta presión sobre los dirigentes políticos para que se tenga en cuenta a la comunidad que trabaja en nanotecnología.

2004-2009. Durante los últimos 6 años la nanotecnología ha entrado a formar parte de las prioridades de la Administración General del Estado, mediante la creación de una Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología que ha tenido cabida en los Planes Nacionales de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I) del periodo 2004-2007 (PNIDI, 2004) y del periodo 2008-2011 (PNIDI, 2008). Estas actuaciones recogen también las recomendaciones de la Comisión Europea para impulsar la implantación de programas específicos en nanotecnología (Comisión Europea, 2004 B).

Las líneas prioritarias de la Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología son:

- Nanotecnologías aplicadas en materiales y nuevos materiales en el ámbito de la salud.
- Nanotecnologías para la información y telecomunicaciones.
- Nanotecnologías en relación con la industria y el medioambiente.
- Materiales inteligentes basados en el conocimiento con propiedades a medida y materiales y recubrimientos de altas prestaciones para nuevos productos y procesos.
- Avances en tecnología y procesado de materiales.
- Desarrollo y validación de nuevos modelos y estrategias industriales. Nuevas tecnologías para el diseño y los procesos de fabricación. Producción en red.
- Explotación de tecnologías convergentes.

Como se puede observar, existe una clara tendencia de favorecer la creación de conocimiento aplicado en sectores muy concretos. Dichos sectores fueron detectados mediante diversos estudios de prospectiva (OPRI, 2008) en los que diferentes temáticas científicotécnicas fueron analizadas, determinando su posición relativa en el entorno internacional, la capacidad tecnológica existente en el país para su posterior desarrollo y el interés que poseían desde una perspectiva de mercado.

Además de las actuaciones propias de los Planes Nacionales, en junio de 2005, el gobierno de España añadió otra más, el denominado Programa Ingenio 2010 (Inge-

nio, 2005), cuya finalidad es acelerar la convergencia con la Unión Europea. Esta nueva iniciativa destina abundantes recursos a la creación de consorcios estratégicos de investigación tanto públicos (Programa Consolider) como público-privados (Programa CENIT). El efecto de estas actuaciones aún no se ha podido calibrar dado que los proyectos aprobados bajo su cobertura sólo llevan dos años en marcha en el mejor de los casos. Estos consorcios estratégicos tienen también como objetivo el incremento de la transferencia de conocimiento desde el sector académico al productivo. Estos consorcios también intentan potenciar la creación de nuevas empresas de base tecnológica (NEBTS), que aprovecharían las infraestructuras que ofrece la extensa red de parques científicos y tecnológicos que cubre todo el territorio nacional (APTE, 2009).

Con la ayuda de todos estos nuevos instrumentos, las universidades, los organismos públicos de investigación, las fundaciones sin ánimo de lucro, los gobiernos regionales, y las empresas han fomentado la creación de grupos e institutos dedicados a nanotecnología. Las universidades también han propiciado la creación de estudios de posgrado de esta temática. Se puede decir que hay un gran dinamismo en España en el ámbito de la nanotecnología, aunque la situación económica actual ha ralentizado algo el ritmo de crecimiento.

LA FINANCIACIÓN DE LA NANOTECNOLOGÍA EN ESPAÑA

La financiación de la nanotecnología en España tiene diversas procedencias. Por un lado nos encontramos con un sector público descentralizado, donde actúan como agentes financiadores tanto el gobierno central como los gobiernos de las comunidades autónomas. Por otro lado, el sector privado no ha efectuado todavía una apuesta nítida por este sector. La cuantificación de la financiación es un tema complejo porque las estructuras de gestión de la información públicas no están suficientemente desarrolladas, por lo que es complejo conocer el gasto, número de proyectos y su tipología, etc., que cada gobierno regional financia. Algo similar ocurre con los fondos provenientes del sector privado: es muy difícil su identificación. Por lo tanto, los datos a los que se tiene acceso de una forma más fidedigna corresponden a las inversiones efectuadas por el gobierno central a través de diferentes informes que se han realizado desde el Ministerio de Ciencia e Innovación (Serena, 2009 A y B). Dichos datos revelan que se ha producido una gran inversión en proyectos, equipamientos, y edificios, que están permitiendo la formación de un verdadero entramado de centros de investigación de excelencia que describiremos más adelante.

Como ejemplo de la inversión efectuada en nanotecnología, el cuadro 1 recoge la cifra actualizada que desde el gobierno de España se destinó a esta temática durante el año 2008. Tal como refleja dicho cuadro, esta inversión se ha llevado a cabo fundamentalmente desde dos ministerios, el de Ciencia e Innovación, y el de Industria, Comercio y Turismo. Las subvenciones otorgadas a proyectos, construcción de centros, equipamiento, etc., han sido superiores a los 60 millones de euros, mientras que se aprobaron casi 23 millones de euros en la modalidad de préstamos a empresas innovadoras. Estas cifras sitúan el conjunto del esfuerzo inversor por parte de la Administración General del Estado en más de 83 millones de euros, lo cual representa un esfuerzo superior a los 1.7 euros por habitante y año. Como se ha mencionado anteriormente estos datos no incluyen la inversión efectuada por los gobiernos de las comunidades autónomas ni la que se realiza desde el sector privado. Tampoco se tienen en cuenta algunas partidas presupuestarias de los departamentos de investigación

CUADRO 1. Esfuerzo presupuestario efectuado por el gobierno de España en el ámbito de las nanociencias y nanotecnologías durante el año 2008

Ministerio	Cantidades otorgadas bajo la modalidad de subvención (k€)	Cantidades otorgadas bajo la modalidad de préstamo (k€)
Ministerio de Ciencia e Innovación	56436.37	16288.31
Ministerio de Industria, Turismo y Comercio	4167.95	6301.56
Total	60604.32	22589.87

Fuente: Ministerio de Ciencia e Innovación de España (<http://www.micinn.es>) y (Serena, 2009B).

del Ministerio de Defensa. En conjunto, estas cifras permiten a nuestro país situarse entre los quince países con mayor inversión per cápita en nanotecnología (Comisión Europea, 2005).

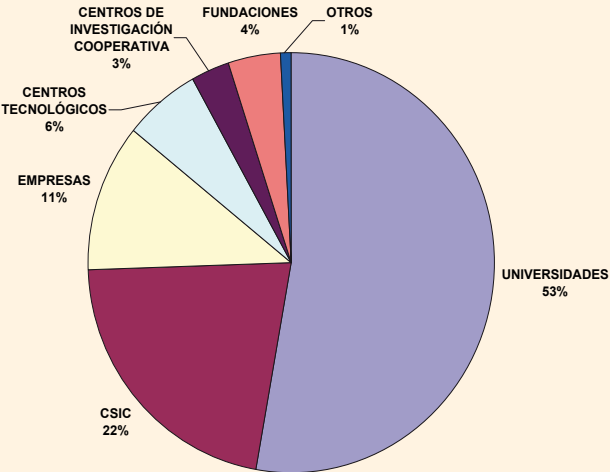
LOS ACTORES ESPAÑOLES DE LA NANOTECNOLOGÍA

La comunidad de científicos que trabajan en nanotecnologías es muy grande y cubre todas las temáticas propias de este ámbito tan sumamente transversal. Por poner un ejemplo, la convocatoria del año 2004 de proyectos de investigación de la Acción Estratégica de Nanociencia y Nanotecnología recibió más de 580 solicitudes de otros tantos grupos de investigación. Es cierto que no todos los grupos que se presentaron a dicha convocatoria trabajaban en ese momento en nanotecnología, pero es evidente que muchos grupos entendieron que la nanotecnología era un tema de futuro al que deseaban acceder.

Una buena fuente de información sobre la actividad en nanotecnología en España la proporciona la Red NanoSpain (NanoSpain, 2009), con más de 275 grupos de investigación registrados en la actualidad, lo que representa a más de 1300 investigadores. Con los datos de esta red, se puede hacer una descripción realista de la situación actual de la nanotecnología española. La figura 1 ilustra el tipo de institución al que pertenecen estos investigadores. Es evidente que el potencial investigador se concentra en el entorno académico, concretamente en las universidades, con el 53%, y en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), con el 22%. La aportación del sector privado y de los centros tecnológicos (generalmente vinculados al sector productivo) sólo representa, en conjunto, un 17% de los laboratorios donde se hace investigación en nanotecnología. Estos datos demuestran que en realidad se sigue haciendo más nanociencia que nanotecnología, aunque se observa un rápido crecimiento del porcentaje de los laboratorios más cercanos a las empresas.

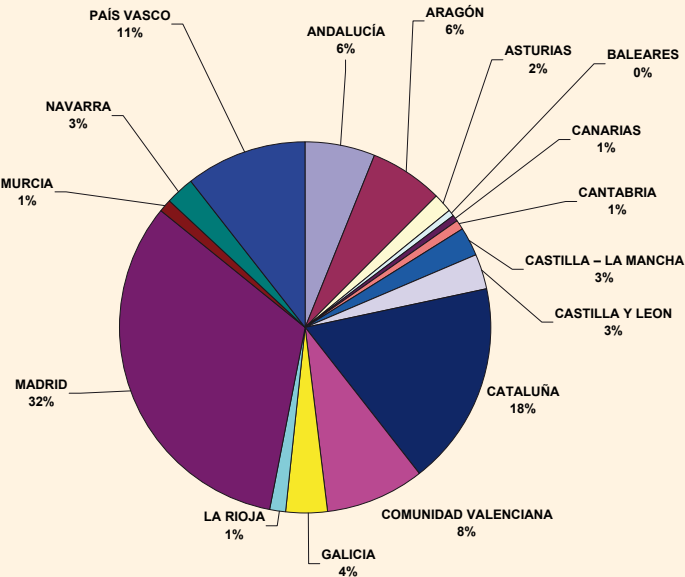
En cuanto a la distribución geográfica de la actividad en nanotecnología, la figura 2 muestra que, tal como ocurre en otros ámbitos de la investigación española, son cuatro las comunidades autónomas en las que se concentra la actividad: Madrid (32%), Cataluña (18%), País Vasco (11%) y Comunidad Autónoma Valenciana (8%). Esta distribución muestra que el 70% de los grupos se concentran en los entornos geográficos donde existen universidades de gran tradición investigadora y, simultáneamente, mayor capacidad industrial. Otras regiones como Navarra o Aragón también tienen un papel relevante a pesar de su pequeño tamaño (en términos de población).

FIGURA 1. Procedencia (por tipo de institución) de los grupos de investigación en nanotecnología en España



Fuente: Elaboración propia y Red NanoSpain (NanoSpain, 2009).

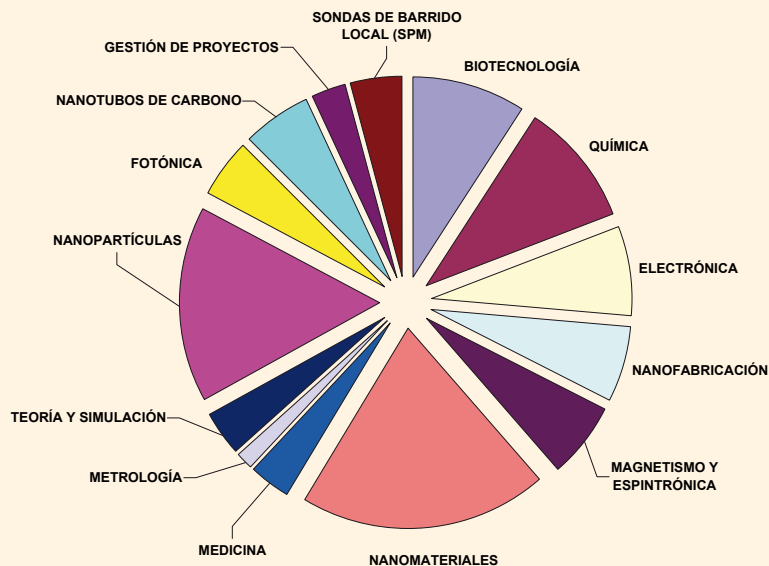
FIGURA 2. Distribución geográfica por comunidades autónomas de los grupos de investigación en nanotecnología en España



Fuente: Elaboración propia y Red NanoSpain (NanoSpain, 2009).

Ya conocemos a los actores, su número y dónde están ubicados. Ahora queda conocer en qué trabajan. La figura 3 muestra la distribución porcentual de las temáticas en las que los grupos de investigación desarrollan su actividad. Es evidente que los temas más destacados son aquellos relacionados con nanomateriales (20%), nanopartículas (16%), química (10%) y biotecnología (9%). La importancia de estas temáticas quizás esté conectada con el tipo de tejido productivo del país, más orientado hacia la manufactura de nuevos materiales para los sectores de la automoción y la aeronáutica, la producción de nuevos catalizadores de aplicación en el sector químico, o hacia la producción de fármacos o sistemas de diagnóstico. Por otro lado, los grupos que realizan su actividad en las temáticas más básicas de fotónica, electrónica, magnetismo y espintrónica son menos abundantes. En este caso, estas actividades también tienen menos peso en la industria española, que no tiene su fuerte en el sector de la electrónica o las comunicaciones.

FIGURA 3. Distribución de las temáticas de investigación desarrolladas por los grupos de investigación en nanotecnología en España



Fuente: Elaboración propia y Red NanoSpain (NanoSpain, 2009).

ALGUNAS ACTUACIONES RELEVANTES

En las secciones anteriores se ha puesto de manifiesto la existencia de dos elementos que explican el auge de la nanotecnología en España. Por un lado, la existencia de numerosos grupos de investigación, que cubren multitud de líneas de investigación, y, por otro, la puesta en marcha de mecanismos de promoción y financiación de la nanotecnología por parte de las administraciones públicas. En este caldo de cultivo, han sido muchas las iniciativas que se han desarrollado, como el establecimiento de re-

des nacionales, regionales o sectoriales, el diseño y la puesta en marcha de nuevos centros de investigación, la adquisición de equipamiento para mejorar el existente en centros más antiguos, la elaboración de informes y estudios de prospectiva, la puesta en marcha de planes de estudios en universidades, el apoyo a la realización de actuaciones dirigidas a la divulgación científica, etc. Es imposible realizar una descripción profunda de cada una de estas iniciativas en este artículo, por lo que se destacará a continuación sólo algunas de ellas. Las iniciativas que se describirán se han seleccionado por estar directamente relacionadas con los siguientes objetivos del Plan Nacional de I+D+I: (i) aumentar el apoyo a los grupos de excelencia; (ii) hacer más eficiente la transferencia de tecnología al sector productivo; (iii) mejorar las infraestructuras y garantizar su acceso a los grupos; (iv) incidir en la internacionalización de la ciencia; (v) coordinar las actuaciones de los distintos agentes financiadores de las actividades de I+D+I, y, (vi) acercar la ciencia a la ciudadanía.

- **Hacia la excelencia: el programa Consolider.** Dentro de la iniciativa Ingenio 2010 se diseñó el Programa Consolider que fomenta la constitución de consorcios de grupos de investigación de reconocido prestigio internacional. Cada consorcio, de una duración de 5 años, está formado por una media de 6 grupos y recibe una financiación promedio de 5 millones de euros. Los consorcios son elegidos tras un exigente proceso de evaluación y únicamente se conceden una decena de nuevos proyectos cada año. El cuadro 2 muestra una relación de los proyectos Consolider relacionados con la nanotecnología que han sido aprobados hasta el momento actual. Este cuadro refleja la variedad de las temáticas de los consorcios de investigación financiados. En conjunto, se han destinado 38 millones de euros en tres años.
- **Fomentar la transferencia: el programa CENIT.** Este programa también forma parte de la iniciativa Ingenio 2010 y tiene como objetivo la constitución de consorcios estratégicos nacionales de investigación técnica (CENIT). Estas ayudas se dirigen a la financiación de grandes proyectos integrados de investigación industrial de carácter estratégico y con largo alcance científicotécnico. Los proyectos aprobados reciben una subvención de entre 15 y 40 millones de euros y su duración es de cuatro años. En los últimos tres años se han aprobado una decena de consorcios CENIT relacionados con la nanotecnología, alcanzando un presupuesto total de 280 millones de euros, de los cuales la mitad se aportan como subvención desde el Estado. Entre las temáticas que destacan podemos señalar las que tienen relación con la aplicación de las nanotecnologías al desarrollo de nuevos fármacos y sistemas de diagnóstico de materiales para la construcción de edificios, para la industria de la automoción, o para la generación de energía fotovoltaica o eólica.
- **Mejora de infraestructuras: el nuevo mapa de centros de nanotecnología.** A lo largo de los últimos años se han ido realizando inversiones con el fin de establecer una red de centros avanzados dedicados a la investigación en nanociencias y nanotecnologías. Estos centros han tenido diferentes mecanismos para su financiación y han surgido, por lo general, bajo la demanda de grupos puntuales de científicos que necesitaban dar un salto cualitativo en su investigación. En la figura 4 se muestra el mapa de lo que será la futura red de centros dedicados a nanotecnología. En el cuadro 3, a modo de leyenda, se identifica cada uno de

CUADRO 2. Consorcios de grupos de investigación que han sido financiados en el periodo 2006-2008 dentro del Programa Consolider (Ingenio 2010)

Año	Título del proyecto	Investigador	Organismo coordinador	Financiación (kf)
2006	Investigación en materia de una nueva generación de materiales, células y sistemas para la conversión fotovoltaica	Antonio Luque López	Universidad Politécnica de Madrid (UPM)	4,000.00 €
2006	Nanotecnologías en biomedicina	Ricardo Ibarra García	Universidad de Zaragoza (UZ)	4,500.00 €
2006	Creación de un nuevo centro de i+d para la coordinación, desarrollo y gestión de la investigación en nanociencias en el país vasco	Pedro M. Echenique Landiribar	Universidad del País Vasco (UPV)	4,500.00 €
2007	Hybrid optoelectronic and photovoltaic devices for renewable energy	Juan Bisquert Mascarell	Universitat Jaume I de Castelló (UJI)	4,000.00 €
2007	Nanociencia molecular	Eugenio Coronado Miralles	Universidad de Valencia (UV)	5,750.00 €
2007	Materiales avanzados y Nanotecnologías para dispositivos y sistemas eléctricos, electrónicos y magneto-electrónicos innovadores	Xavier Obradors Berenguer	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)	5,000.00 €
2007	Nanolight.es - Light control on the nanoscale	Niek van Hulst	Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)	6,685.00 €
2008	Engineering metamaterials	Javier Martí Sendra	Universidad Politécnica de Valencia (UPV)	3,500.00 €

Fuente: Elaboración propia, Ministerio de Ciencia e Innovación de España (<http://www.micinn.es>) y (Serena, 2009B).

estos centros. Éstos están en fase de lanzamiento y estarán a pleno rendimiento en una década.

- **Iniciativas de internacionalización.** Tras unos años de fuerte desarrollo de nuestras capacidades científicas ha llegado el momento de hacer un esfuerzo por dar visibilidad a toda la ciencia y tecnología españolas en el exterior. La nanotecnología no es ajena a esta situación, y desde diversas entidades se busca la mejor forma de promocionar los resultados de nuestros laboratorios. Por ejemplo, el Instituto Español de Comercio Exterior (ICEX, 2009) en colaboración con la Fundación Phantoms (Phantoms, 2009) han facilitado la participación de centros de investigación, universidades y empresas en ferias internacionales, entre las que destacan los eventos Nano Tech 2008 y 2009, que se celebraron en Tokio. Otras actuaciones relacionadas con la internacionalización de la nanotecnología se diseñan y ejecutan en el Ministerio de Ciencia e Innovación, mediante la firma de convenios bilaterales como los que se han establecido en 2009 con la India o Japón. El CSIC ha firmado convenios específicos con Taiwán que incluyen la financiación de proyectos conjuntos de nanotecnología.

FIGURA 4. Mapa de los centros emergentes en nanotecnología en España. Los números indican la ubicación de los centros descritos en el cuadro 3



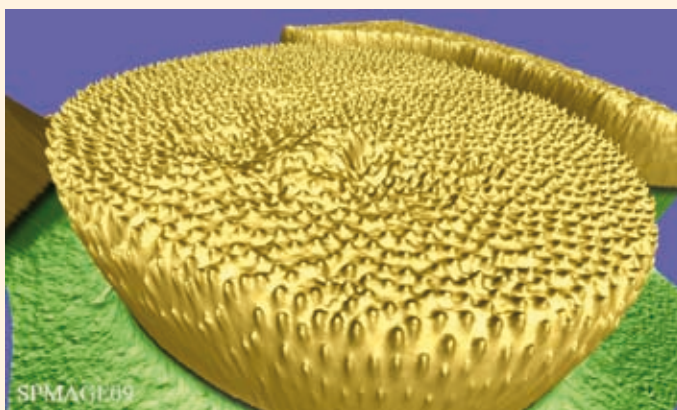
CUADRO 3. Centros en marcha o en fase de construcción relacionados con la investigación en nanociencia y nanotecnología

	Nombre del centro	Patrocinadores	Sitio web
1	Laboratorio Ibérico Internacional de Nanotecnología, Braga (Portugal)	Gobiernos de Portugal y España	http://www.iinl.org/
2	Centro de Investigación de Nanomateriales y Nanotecnología (CINN)	Universidad de Oviedo, CSIC y Principado de Asturias	(web no disponible)
3	CIC Nanogune (País Vasco)	Gobierno Vasco, Universidad del País Vasco, y Ministerio de Ciencia e Innovación	http://www.nanogune.eu
4	Instituto Universitario de Nanociencias de Aragón (INA)	Universidad de Zaragoza y Gobierno de Aragón	http://www.unizar.es/ina/ina.htm
5	Centre d'Investigacions en Nanociència i Nanotecnologia (CIN2)	Institut Català de Nanotecnologia (Generalitat de Catalunya) y CSIC	http://www.cin2.es
6	Institut de Ciències Fotòniques (ICFO)	Generalitat de Catalunya	http://www.icfo.es
7	Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia (NTC)	Universidad Politécnica de Valencia	http://www.ntc.upv.es/index.html
8	Centro Andaluz de Nanomedicina y Nanotecnología (BIONAND), Málaga	Junta de Andalucía	(sin web disponible)
9	IMDEA-Nanociencia	Comunidad de Madrid y Ministerio de Ciencia e Innovación.	http://www.nanociencia.imdea.org

Fuente: Elaboración propia y (Correia, 2008; Serena, 2009 A; Serena, 2009 B).

- **Mejorando la coordinación: la creación de los Observatorios ICONO.** La Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT, 2009) está poniendo en marcha en estos momentos el Observatorio Nacional de la Innovación y del Conocimiento (Observatorio ICONO). Este observatorio se encargará del seguimiento y análisis de las políticas desarrolladas por las administraciones en el ámbito de las actividades de I+D+I, y además podrá elevar propuestas de actuación y medidas correctoras. El observatorio ICONO contará con un grupo de trabajo exclusivamente dedicado al seguimiento de la nanociencia y la nanotecnología, que puede ser de gran importancia en la coordinación y optimización de los recursos destinados a estas temáticas.
- **Acercando la nanotecnología a la ciudadanía.** Para asentar una línea multidisciplinar como la nanotecnología se debe asegurar la continuidad en la generación del conocimiento a mediano y largo plazo, lo cual requiere el diseño de planes adecuados de formación. Por otro lado se tiene que hacer participe a la sociedad tanto de los avances científicos como de los riesgos que siempre conllevan, de las soluciones que se proponen. Por esto es necesario incentivar la divulgación científica. En el caso de la formación, se puede afirmar que, en estos momentos, las universidades españolas ofrecen una buena oferta en el ámbito de la nanotecnología, con casi una veintena de cursos de maestría y doctorado. En relación con las actividades de divulgación, no existe hasta la fecha un plan específico dedicado a la nanotecnología. Sin embargo, han surgido algunas iniciativas aisladas que cuentan con el apoyo financiero, total o parcial, de algunas instituciones, entre las que destaca la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT, 2009). Entre estas iniciativas podemos destacar el Concurso internacional de imágenes de microscopía SPM (SPMAGE, 2009) que posteriormente ha permitido la publicación de una galería virtual y la preparación de una exposición itinerante. En la figura 5 se muestra la imagen ganadora de la edición del año

FIGURA 5. Imagen ganadora de la edición del año 2009 del concurso internacional SPMAGE, de imágenes obtenidas mediante microscopías de campo cercano (SPM). El autor es el Dr. Li Ang de la Universidad de Singapur. El título de la imagen es "Human malaria (*Plasmodium malariae*) infected red blood cells".



Fuente: (SPMAGE, 2009).

2009. En este apartado es obligado mencionar la publicación del primer libro de texto en lengua castellana sobre nanotecnología (Martín-Gago, 2008). Con esta iniciativa se pretende atraer a jóvenes estudiantes hacia las carreras universitarias de ciencias.

EL FUTURO: PROBLEMAS A LA VISTA Y POSIBLES SOLUCIONES

Se ha hecho un resumen del gran número de actuaciones que se están llevando a cabo en España para promover una investigación de calidad y competitiva internacionalmente en el ámbito de las nanotecnologías. Sin embargo, no todo es positivo y se detectan ciertos problemas que deben ser abordados para mantener el ritmo para lograr una eficiente implementación de las nanotecnologías tanto en el entorno académico como en el industrial. Los puntos siguientes especifican algunos de estos problemas y se mencionan las soluciones que ya se han propuesto (o que sería deseable proponer).

- **Una deficiente gestión de la ciencia.** Este es un problema que afecta al conjunto del sistema español de I+D+I. Aunque han aumentado mucho los recursos dedicados a investigación, los organismos encargados de la gestión de los mismo siguen regidos por normativa y protocolos poco eficientes. La manera en que se realiza la gestión de convocatorias, la selección y contratación de personal técnico o investigador, la compra de equipamiento, etc., debe mejorarse significativamente para no perder competitividad frente a otros países, que poseen mecanismos de gestión más ágiles y eficientes. Para propiciar un nuevo marco legal que permita la solución de estos problemas, el Ministerio de Ciencia e Innovación está preparando un importante cambio legislativo a finales del año 2009 (Ley Ciencia, 2009). Los efectos de este cambio se pondrán de manifiesto en tres o cuatro años.
- **¿Hay que dedicar más recursos a la investigación?** La crisis ha golpeado con dureza a la economía española, que creció a fuerte ritmo basándose en el desmesurado crecimiento de la construcción, la globalización de algunas empresas de servicios (esencialmente bancarios y de comunicaciones), y el mantenimiento de sectores tradicionales como el turismo o la fabricación de vehículos. Mientras tanto, el déficit de la balanza comercial de productos de alta tecnología no ha hecho más que aumentar en los últimos veinte años (COTEC, 2009). Es cierto que se necesita cambiar de modelo, pero con el contratiempo de tener que hacerlo en medio de una crisis. La apuesta debe ser clara: invertir en educación (en todos los niveles y modalidades), fomentar la investigación (básica y orientada) y su transferencia, e impulsar las infraestructuras relacionadas con las comunicaciones. ¿Cómo lograr todo esto en un momento de recortes presupuestarios? Ese es el gran reto, pero las actuaciones requerirán valentía y hacer cómplices a la ciudadanía mediante una buena información sobre las políticas que se pongan en marcha.
- **La falta de vocaciones científicas.** Es paradójico que en un momento en el que desde las diversas administraciones se promueve el asentamiento de nuevos centros de investigación en nanotecnología, las facultades de ciencias de las

distintas universidades ven disminuir progresivamente el número de alumnos matriculados. Corregir esta tendencia requiere de medidas más agresivas que las que se han tomando hasta ahora, pasando por una planificación de la formación en nanotecnología adaptada a todos los niveles educativos, como ocurre en Corea, Japón o Taiwán, países en los que se incorporan los contenidos de la nanotecnología ya en la educación primaria.

- **La falta de coordinación y dispersión de las infraestructuras.** La configuración política de España, con comunidades autónomas que poseen muchas competencias y recursos transferidos desde el gobierno central, junto con la autonomía de las universidades y centros públicos de investigación, ha generado un modelo de crecimiento en el que la coordinación de los centros emergentes no se ha tenido en cuenta. Es fundamental que los grupos de investigación compitan entre sí y con los de otros países pero garantizando el acceso de todos los grupos a infraestructuras de alto nivel que se sufragan con recursos públicos. Para lograr este acceso, es necesario hacer inventario de los equipamientos que se poseen (un mapa de infraestructuras), su grado de uso, determinar las prioridades de adquisición de nuevos equipos y su óptima ubicación, garantizar el acceso a los usuarios, planificar la adecuada formación de usuarios y técnicos, entre otros asuntos. Estos pasos sólo se pueden dar mediante una mínima planificación y coordinación entre las autoridades estatales y autonómicas.
- **La poca masa crítica de las empresas del sector nanotecnología.** Otro aspecto que merece la pena destacar es la escasa relevancia que aún tiene la nanotecnología en el ámbito industrial español. La mayor parte de las empresas españolas no son innovadoras (COTEC, 2009) y realizan poca inversión en I+D+I. Esta claro que una posible solución pasa por la creación de nuevas empresas de base tecnológica (NEBTs), muchas de las cuales serán empresas de tipo spin-off vinculadas a universidades y organismos públicos de investigación. Para aumentar el número de estas empresas, sería necesario potenciar su capitalización mediante el fomento de entidades de capital-riesgo, la participación pública en las mismas, las compras públicas de servicios y productos, las desgravaciones fiscales, etc. Además, no hay que olvidar que las empresas del sector de la nanotecnología deben acceder en condiciones ventajosas a grandes instalaciones de nanofabricación o caracterización que resultan excesivamente costosas para una empresa de nueva creación.
- **Internacionalización: Iberoamérica, la asignatura pendiente.** Es cierto que el papel relevante de España en ciencia se ha alcanzado en los últimos veinte años, y que carecemos de “tradición” científica si nos comparamos con EUA, Alemania, Reino Unido, Francia, etc. En este contexto, España necesita reforzar sus lazos científicos con comunidades de otros países. Se han dado grandes pasos en la dirección de mejorar nuestra interacción con los países de la Unión Europea, EUA, Canadá, y los países de extremo oriente. Sin embargo, salvo algunas iniciativas como el Programa CYTED o algunos convenios interuniversitarios, el papel de España en los países iberoamericanos no es tan importante como el que tiene Francia, por ejemplo. Para mejorar esta situación, se debe fomentar desde España el intercambio de investigadores (ya formados o en vías formación) con centros y universidades de Iberoamérica, incrementar la interacción entre re-

des de científicos, promover la firma de convenios de investigación en temas de interés conjunto, etc. Es en este contexto que la creación del Laboratorio Internacional Ibérico de Nanotecnología de Braga, puede ser un buen punto de apoyo para revitalizar la cooperación científica entre Portugal, España e Iberoamérica.

CONCLUSIONES

Este artículo resume las principales actuaciones que en este momento se están llevando a cabo en el ámbito de la nanociencia y la nanotecnología en España. Las iniciativas mostradas tienden a fomentar la investigación básica sin perder de vista la importancia de su transferencia al tejido productivo. Esta situación se alcanza, en parte, gracias a los dos últimos Planes Nacionales de Investigación, Desarrollo e Innovación en los que la nanociencia y la nanotecnología se han colocado como prioridades del gobierno, adquiriendo la categoría de acción estratégica. Asimismo, se ha promovido la creación de un conjunto de centros de investigación que estarán a pleno rendimiento en los próximos diez años. Además, se están haciendo grandes esfuerzos por facilitar la conexión de los grupos españoles con los del resto del mundo, a través de diferentes convenios bilaterales y la participación en los foros internacionales. En su conjunto, la inversión de recursos públicos para promover la nanociencia y la nanotecnología en España ha superado los 80 millones de euros en 2008, lo que refleja la importancia que este tema ha adquirido en los últimos años.

Todas las iniciativas que se han repasado en este artículo representan una apuesta clara para que España se sitúe a medio plazo entre el grupo de países que pueden liderar el cambio hacia una sociedad basada en el conocimiento. El reto a corto plazo es mantener el impulso inversor, a pesar de encontrarnos en plena crisis económica, y mejorar la coordinación de todos los agentes implicados en el proceso de I+D+I.

BIBLIOGRAFÍA

- APTE. 2009. Asociación de Parques Tecnológicos de España.
En: <http://www.apte.org>
- Baird, D., Nordmann, A. y Schummer, J. (eds.). 2004. *Discovering the nanoscale*, IOS Press, Amsterdam.
- Banco Mundial. 2007. *World development indicators database*, World Bank, Washington.
- Binnig, G. and Rohrer, H. 1987. "Scanning tunneling microscopy-from birth to adolescence", *Reviews of Modern Physics* 59, 615.
- Comisión Europea. 2004 A. *Converging technologies: Shaping the future of european societies*, Bruselas. Este documento está accesible en http://europa.eu.int/comm/research/conferences/2004/ntw/index_en.html.
- Comisión Europea. 2004 B. "Hacia una estrategia europea para las nanotecnologías", *Comisión Europea, COM* (2004) 338.
- Comisión Europea. 2005. *Some figures about nanotechnology R&D in Europe and beyond*. Bruselas.
- COTEC. 2009. *Informe Cotec: tecnología e innovación en España, 2009*, Fundación COTEC, Madrid. Este informe se puede descargar de <http://www.cotec.es>

- Correia, A., Sáenz, J.J. y Serena, P.A. 2006. "El lento despertar de la Nanotecnología en España", *Revista Sistema Madri+d* 15, 3.
- Correia, A., Pérez, M., Sáenz, J.J. y Serena, P.A. 2007. "Nanoscience and nanotechnology: driving research and applications", *Phys. Stat. Sol. (RRL)* 1, A68-A72.
- Correia, A. y varios autores. 2008. *Nanociencia y nanotecnología en España: un análisis de la situación presente y de las perspectivas de futuro*, Fundación Phantoms, Madrid.
- Delgado, Gian Carlo. 2008. *Guerra por lo invisible: negocio, implicaciones y riesgos de la nanotecnología*, CEICH, UNAM, México.
- Delgado, Gian Carlo. 2009. "Economía política de la nanotecnología", *Mundo Nano* 1, 87.
- Drexler, K.E. 1986. *Engines of creation. The coming era of nanotechnology*, Anchor Books, Nueva York.
- FECYT. 2009. Fundación Española de Ciencia y Tecnología. En: <http://www.fecyt.es>
- Feynman, Richard. 1960. "There's a plenty of a room at the bottom", *Engineering and Science* 23, 22. Una transcripción del discurso de R. Feynman puede encontrarse en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- Fielder, F.A. y Reynolds, G.H. 1994. "Legal problems of nanotechnology: An overview", *Southern California Interdisc. Law J.*, 3, 593-629.
- Fontela, Emilo y varios autores. 2006. *Convergencia NBIC 2005. El desafío de la convergencia de las nuevas tecnologías (Nano-Bio-Info-Cogno)*, Fundación Escuela de Organización Industrial (Eoi), Madrid.
- ICEX. 2009. Instituto Español de Comercio Exterior. En: <http://www.icex.es>
- Iijima, Sumio. 1991. "Helical micro-tubules of graphitic carbon", *Nature* 345, 56.
- Ingenio. 2005. Programa Ingenio 2010. En: <http://www.ingenio2010.es>
- ISI Thomson. 2008. *Essential science indicators* (<http://sciencewatch.com/>).
- Kleike, J.W. (ed.). 2009. *National nanotechnology initiative: Assessment and recommendations*, Nova Science Pub. Inc., Nueva York. Toda la información sobre las actividades de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de EUA. se puede encontrar en <http://www.nni.gov>.
- Ley Ciencia. 2009. Nueva Ley de la Ciencia y de la Investigación. En: <https://lcyt.fecyt.es/>
- Lux Research. 2008. *Nanomaterials state of the market Q1 2009: Cleanthc's dollar investments, penny returns*, Lux Research, Nueva York.
- Martín-Gago, J.A., Casero, E. Briones, C., y Serena, P.A. 2008. *Unidad Didáctica Nanociencia y Nanotecnología. Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro*, Fundación Española de Ciencia y Tecnología, Madrid. Este libro está disponible gratuitamente en: <http://www.fecyt.es>.
- Moore, Gordon. 1965. "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics* 38, 114.
- NanoSpain. 2009. Red Española de Nanotecnología. En: <http://www.nanospain.org>
- OPTI. 2008. *Aplicaciones industriales de las nanotecnologías en España en el horizonte 2020*, Fundación OPTI y Fundación INASMET-TECNALIA, Madrid. Dicho libro puede descargarse gratuitamente desde <http://www.opti.org>
- Phantoms. 2009. Fundación Phantoms. En: <http://www.phantomsnet.net>
- PNIDI. 2004. *Plan Nacional de I+D+I 2004-2007*. En: http://www.mec.es/ciencia/plan_idi
- PNIDI. 2008. *Plan Nacional de I+D+I 2008-2011*. En: <http://www.plannacionalidi.es>

- Roco, M.C. y Bainbridge, W.S. (eds.). 2001, *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, Kluwer Press, Boston (EUA) y Dordrecht (Holanda).
- Roco, M.C. y Bainbridge, W.S. (eds.). 2002. *Converging technologies for improving human performance: Nanotechnology, biotechnology, information technology and the cognitive science*, National Science Foundation, Arlington, Virginia.
- Roco, Mihail C. 2005. "International perspective on government nanotechnology funding in 2005", *J. Nanopart. Res.* 7, 707.
- Serena, P.A. (ed.). 2005. "Nanotechnology in Spain", *International Journal of Nanotechnology* 2, Special Issue.
- Serena, P.A. 2009 A. "The implementation of the Action Plan for Nanosciences and Nanotechnologies in Spain (2005-2007)", *E-Nano Newsletter*, 15, 14. La versión completa de este informe se encuentra también en <http://www.oemicinn.es/area5/area12>
- Serena, P.A. 2009 B. "A survey of public funding of nanotechnology in Spain over 2008". Informe del Ministerio de Ciencia e Innovación para la Comisión Europea. Se publicará en otoño de 2009 en la web <http://www.oemicinn.es/area5/area12>.
- Sweeney, A.E.; Seal, S. y Vaidyanathan, P. 2003. "The promises and perils of nanoscience and nanotechnology: Exploring emerging social and ethical issues", *Bulletin of Science, Technology & Society* 23, 236.
- Shatkin, Jo Anne. 2008. *Nanotechnology: Health and environmental risks (Perspectives in nanotechnology)*, CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton.
- SPMAGE. 2009. International Scanning Probe Microscope Image Prize. En: <http://www.icmm.csic.es/spmage>
- Taniguchi, Norio. 1974. "On the basic concept of 'nano-technology'", *Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II*, Japan Society of Precision Engineering.
- TNT. 2009. Serie de Conferencias *Trends in nanotechnology*. En: <http://www.tntconf.org>

Hacer nanociencia en Cuba: entre lo propio y lo impropio

ROGELIO G. DÍAZ MÉNDEZ*

RESUMEN. La evolución de la nanociencia en Cuba es una auténtica aspiración de nuestro potencial científico en varios campos de la investigación. Si bien en condiciones de subdesarrollo algunos centros nacionales han logrado establecer un nivel medianamente aceptable de participación en la comunidad internacional con relación a conocimientos teóricos, a mucha distancia andamos de los círculos que marcan el paso de la investigación de sistemas de dimensiones pequeñas. En este trabajo analizamos algunas particularidades generales de la creación científica en esta esfera como introducción a un debate más profundo y detallado. Entendemos que no es sino en esa dirección, la del logro de un acervo científico de primera línea, donde se podrá tener una esperanza de sólido desarrollo económico y social.

PALABRAS CLAVE: desarrollo, nanotecnología, Cuba.

ABSTRACT. Nanotechnology evolution in Cuba is an authentic aspiration of our scientific potential in diverse research fields. Even that it is true that in underdevelopment conditions, some national research centers have achieved decent levels of participation within the international community in relation to theoretical knowledge, we still are faraway from the circle that set the rhythm of research on systems of very small dimensions. In this article we analyze some general particularities of the scientific creation of such a circle as a first step for a more deep and detailed debate. We understand that only in that direction, the one of the construction of a first class scientific heritage, it will be possible to have hope on a solid economic and societal development.

KEY WORDS: development, nanotechnology, Cuba.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento de los procesos naturales que ocurren en los sistemas a escala nanométrica, esto es, en dimensiones espaciales del orden de una mil millonésima de metro, es un proceso multidisciplinario en general que ha sido nombrado nanociencia. Desde las últimas dos décadas el avance en técnicas de litografía y deposición ha hecho posible manipular muestras reales a escala atómica y ha disparado la investigación fundamental en este campo con vistas al logro de una innumerable cantidad de aplicaciones prácticas futuras. [1] Ahora es difícil imaginar una rama tecnológica del mundo de mañana que no contenga como núcleo un ensamblado nanométrico. El reto planteado en el marco tecnológico depende en gran medida de la comprensión teórica que se logra en la investigación fundamental.

El impacto social que tiene el nivel de desarrollo científicotecnológico de un país es un asunto complejo que depende tanto del sistema políticosocial establecido como del nivel cultural general entre otras variables. Sí está claro, empero, la importancia económica de la tecnología en cualquier forma de organización de la actividad produc-

* Grupo de Nanofísica, Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Eléctrica, CUJAE, ave 114 final, La Habana, Cuba. Cátedra de Sistemas Complejos "Henri Poincaré", Facultad de Física, Universidad de La Habana, CP 10400, Cuba.

tiva. Consideraremos sin argumentación que el nivel de la ciencia y de la tecnología contribuyen positiva y directamente sobre la sociedad elevando los índices culturales, la calidad de vida material y espiritual, y el acervo cognoscitivo de la población; cosa que en buena aproximación es cierta para la mayoría de los países, digamos, de bienestar social. Nos interesa más centrar la atención en cómo lo sociopolítico puede y debe influir sobre lo científicotecnológico, especialmente en condiciones de subdesarrollo, visto este último de forma puramente económica.

En general, el análisis que hacemos rebasa los límites (no estrechos) del enfoque de la nanociencia que hemos escogido para particularizar y fijar ideas. Al ser ciencia un término tan general y polimorfo en el sentido de su praxis, entendimos que centrarnos en la nanociencia dejará ver mejor qué tratamos de discursar sobre el trabajo que transcurre en el límite de lo comprendido. Y es, además, como hemos dicho, una de las disciplinas tecnológicamente más prometedoras del futuro. De cualquier forma, la fuerte impronta multidisciplinaria de la investigación científica actual hace imposible un estudio demasiado aislado del desarrollo de una sola rama de la ciencia. Así, la investigación moderna debe entenderse en un enfoque holístico que incluya la presencia e interrelación de todos los campos en que metodológicamente se divide el conocimiento científico.

Es por eso que una aproximación seria al desarrollo de la nanociencia en Cuba lleva directamente al problema de la actividad científica nacional en general. Más aún, como será obligatorio pasar por el análisis de algunas variables históricas y económicas que son comunes a muchos de los países del área, cuando no a todo el Tercer Mundo, estaremos entrando en una generalización mayor. Veremos que es en este aparente alejamiento que encontramos el problema central: una contradicción en cuyo desenlace puede descansar la esperanza de desarrollo integral de nuestros países.

CREENCIA ENGAÑOSA

Es común relegar a un plano invisible la importancia de la investigación fundamental y por lo general tiende a sobrestimarse el papel de la sola tecnología. En parte porque a la primera se le sitúa lejos de la práctica, cuando a veces no lo está tanto, y también porque no se analiza con justeza lo percedero de cualquiera de ellas sin la otra. Es un criterio erróneamente instalado el que sólo los países con un gran desarrollo económico pueden darse el lujo de invertir grandes sumas en estudios teóricos¹; una simple revisión crítica del tema arrojaría un resultado medular y simple: sólo la investigación fundamental garantiza continuidad tecnológica. La historia (productiva, social, espiritual) es generada en un proceso en el que lo teórico y lo técnico se entrelazan, estrechan y vuelven a separarse continuamente en cada materia, en cada especialidad. No le queda a la actividad científica fundamental el simple papel de generadora de conocimiento, digamos, enciclopédico —que por demás ya la justificaría con creces— en un limbo desconectado de la vida ordinaria; en una incesante dinámica, la transformación diaria de ciencia en tecnología es una realidad absoluta y frecuente, sólo que no dentro de nuestras fronteras.

¹ En general, utilizamos la categoría *teórico* para referirnos a la investigación científica tanto teórica como experimental, con el objetivo de diferenciarla de la aplicada y/o tecnológica.

La Universidad Paul Sabatier al sur de Francia puede tener un equipo de físicos estudiando la adhesión de partículas de oro en nanotubos de carbono, un gran centro de cómputo evaluando los mínimos del hamiltoniano para sugerir las mejores condiciones del sistema y un edificio de ingeniería prestos a diseñar un modelo de nuevo disco duro tras el éxito del experimento, todo eso en menos de un kilómetro cuadrado y no vinculado con grandes empresas tecnológicas. De esta forma, el modelo de desarrollo científico de las sociedades avanzadas de hoy muestra claramente esta interrelación de enriquecimiento mutuo imposible de encontrar en otras latitudes. Es cierto que existe en todas partes el problema del financiamiento de la investigación fundamental y que éste se agrava así se haga el objetivo científico menos aplicable o menos de corto plazo; pero, obviamente, no caben las comparaciones.

Ahora bien, ¿cuántos países de nuestra América no tienen o tuvieron alguna vez industrias de última tecnología: centrales azucareros, refinerías, etc.? útil inversión de mediano plazo en lo económico, que no sirve a la larga sino para disfrazar de desarrollo la inexistencia de un verdadero, armónico binomio ciencia-tecnología. El intento de la fábrica de componentes microelectrónicos de Pinar del Rio es quizá uno de los ejemplos nacionales más representativos de esta malformación; nos enseña que la solución no puede ser tecnología aislada: una nueva fábrica de componentes nanoelectrónicos tampoco perduraría. Desarrollo ficticio es el basado en la importación de tecnología, ella no es más que el bello fruto de un árbol mucho más grande, el de la ciencia, y sus raíces son la educación.

Resulta por otro lado muy improbable que los países desarrollados, su evolución histórica, puedan señalar el rumbo hacia el establecimiento de una relación ciencia-tecnología-sociedad próspera y armoniosa en nuestra situación actual. Para decirlo en palabras cercanas a Jhon Womack, [2] eventualmente las lecciones —la posibilidad que brinda el estudio del pasado— no sirven para diseñar estrategias presentes. Y este caso es típico: así como clara es la meta, oscura y engañosa sería cualquier enseñanza que un repaso histórico superficial pueda darnos al estudiar la forma en que las potencias científicas han llegado a ser lo que son. Es una verdad simple y, sin embargo, merece comentarse con detenimiento y sentido de trascendencia.

Si, como sabemos, el desarrollo de la ciencia —casi no hará falta decir en el primer mundo— ha estado calzado siempre directa o indirectamente por la supremacía económica, la soberanía política y la superioridad educativo-cultural, hoy ya no es postergable repensar las estrategias de quienes hemos ido a la saga; hay que buscar conscientemente un otro camino. Coincidimos con Galeano en que “el subdesarrollo no es una etapa en el camino al desarrollo sino su consecuencia;” [3] también nosotros figuramos de cierta forma en la historia de la ciencia, si bien con un papel secundario y poco feliz. El cambiar ese papel arcaico, rediseñarlo en el nuevo entorno político, educativo y sociocultural de nuestra realidad está íntimamente ligado a la perspectiva de independencia económica.

Se impone un reto difícil. Nunca, salvo contadas excepciones y en condiciones muy poco parecidas a las de Cuba o Latinoamérica en general, se ha emprendido una marcha consistente del subdesarrollo al desarrollo. Es de suponer entonces que esperar condiciones de bonanza económica permisivas, causantes de un auge en la investigación fundamental, de un alza en el presupuesto asignado a la ciencia, es evidentemente ilusorio. Así, el medio en que se forje un desarrollo autoconsistente para los países del tercer mundo no puede ser otro que el de una verdadera voluntad científica en la base del sistema político-social.

PROBLEMA, POTENCIAL Y VOLUNTAD ECONÓMICA

En nuestro país la actividad científica en la frontera del nanómetro se ha establecido, precaria y desligada, pero conscientemente, en algunos núcleos de la investigación como el Centro de Inmunología Molecular (CIM), el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB), la Facultad de Física y el Centro de Antígenos Sintéticos de la Universidad de La Habana, y el Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF). Si bien la cantidad de científicos que trabajan hoy en ellos dista mucho de ser la adecuada, sí parece que han servido para consolidar una masa crítica de especialistas que en la generalidad de los casos están perfectamente al nivel de la fuerza de trabajo media europea.

Con la excepción de los centros del polo científico más vinculados al sistema cubano de salud, justamente financiados y respaldados de manera especial por la ineludible importancia social (y económica en algunos casos) que representan a mediano y corto plazo, el desarrollo de la nanociencia y de la ciencia fundamental en general no es visto como debería serlo. Los planeamientos generales que insinúan la posición de la dirección del CITMA [4] con respecto a la investigación nanométrica reflejan de nuevo una marcada inclinación a lo tecnológico y ningún plan serio de financiación.

El asunto de la financiación de la ciencia es un complejo tema que este trabajo no aborda directamente, aun cuando la propuesta básica que surge del análisis tiene que ver fundamentalmente con él. La razón es simple: no son los mecanismos de financiación —que es donde se centra esa complejidad—, lo que más nos interesa. En el caso particular de Cuba pudiera establecerse con relativa facilidad el flujo de recursos que alimenta la investigación; sin embargo, en el resto de los países, la estructura es más diversificada. Tienen un papel de especial fuerza el sector privado y las transnacionales que desarrollan investigaciones con fines mayormente no sociales, por lo que no cumplen las hipótesis que hemos supuesto al inicio y se sitúan fuera de nuestro estudio. De esta forma, no estaremos abordando todo el trabajo científico que se realiza dentro de los países sino todo aquel que tributa a estos países, aunque con bastante frecuencia se haga fuera.

No es obvio que en condiciones de subdesarrollo pueda siempre prestarse una especial atención a la investigación teórica cuando tanto capital debe dedicarse a lo estrictamente social. Es impostergable ocuparse de la satisfacción de las necesidades básicas de toda la sociedad. Sin embargo, estamos frente a una serpiente que muerde su propia cola: el mantenimiento del nivel socioeconómico se logra con mucho trabajo a costas, entre otras cosas, de una baja financiación de la ciencia, y esa malformación en lo científico, por su parte, garantiza la dependencia técnica que mantiene a los países en una relación de dependencia económica para con las potencias científico-tecnológicas y, así, vuelve a cerrarse el ciclo. Este círculo es el centro del problema.

Las condiciones particulares de Cuba como poseedora de un nivel educativo bastante avanzado son de especial importancia para la concreción de una estrategia seria que corte ese círculo. Erróneamente podría suponerse que una inyección de capital en la economía, o de forma más sutil un fuerte impulso tecnológico, sería capaz de lograrlo. No; sin duda alguna elevaría los niveles de productividad en poco tiempo, pero no podría lograr una estabilidad de largo plazo en tanto la economía está supeditada de base a los centros industriales de poder que son, además, los dueños de la tecnología y los únicos capaces de incorporar los resultados científicos a nuevas aplicaciones prácticas. De esta forma, más tarde o más temprano, habría que hacer nuevamente

recortes para sostener el nivel socioeconómico. Así, es claro que el círculo sólo podrá romperse definitivamente con eso que hemos llamado voluntad científica, un término que incluye tanto inyección de capital hacia la investigación fundamental como la prestación del máximo interés por parte del sistema político a esta actividad; lo veremos más adelante.

El fortalecimiento de la actividad científica, que deberá ser escalonado pero notable y consistente, no ofrece resultados de momento, aunque a mediano plazo podrán comenzar a experimentarse efectos positivos en algunas ramas de la actividad económica y sobre todo en la elevación de índices socioculturales —que ha sido un asunto al que la comunidad científica nacional viene prestando una especial atención, [5] alarmada por un sensible incremento de la actividad y divulgación de la pseudociencia—, entre otras cosas por la necesidad de especialistas que demandará la tarea. Un periodo en que los precarios vínculos actuales que acercan la industria a los centros de investigación irán aumentando y fortaleciéndose de forma gradual. Pero es a largo o muy largo plazo cuando comenzará a romperse de forma definitiva la cadena que verdaderamente subyace en la dicotomía desarrollo-subdesarrollo. Así, cada vez estará más cerca el momento en que podamos ser nosotros también generadores de excelente tecnología y no sólo mantener con estabilidad sino impulsar con absoluta garantía el nivel socioeconómico.

UNA CONFERENCIA INTERESANTE

Hace unos años el profesor Ernesto Altshuler dictó en la Facultad de Física una conferencia llamada “El top 10 de la *PRL*”. La *PRL* (*Physical Review Letters*) es en buena aproximación la revista científica más importante especializada sólo en física, donde se publican trabajos de investigación fundamental tanto teórica como experimental. El ánimo de la conferencia era comentar los 10 artículos más importantes de la historia de la revista, teniendo como medidor la cantidad de veces que se han citado en esa y otras publicaciones de impacto.

Finalizando aquel encuentro, el ponente se tomó la libertad de hacer un análisis expresamente *naïve*; comparó, de manera simple, las condiciones materiales necesarias para llevar a término cada una de las 10 investigaciones con las condiciones materiales que tenían los físicos cubanos en el año de publicación de cada trabajo. Interesante resultado: 7 de ellos podían haberse realizado en Cuba. Esta conclusión, hecha sólo con la intención de motivar con lo curioso, simplificada de antemano, revela, sin embargo, una importante arista de nuestro problema: no basta con tener un potencial científico de buen nivel, no es suficiente con asegurar lo estrictamente material.

Una ojeada a los Premios Nobel de Física, para irnos a un ejemplo extremo pero clarificante, deja ver la interrelación que existe entre unos y otros. Las nacionalidades parecen ser aleatorias (en cierto espectro, por supuesto), pero a un experto en historia de la ciencia no se le escaparía que la relación entre ellos, o mejor, entre los grupos de investigación a los que han pertenecido, es bien estrecha. Por lo general, uno fue alumno del otro, o trabajó buen tiempo en su grupo antes de tener el propio, que luego formó al siguiente. Es decir, obviamente no se trata sólo de poder comprender los artículos más avanzados y tener facilidades de investigación, sino de que existe una tradición científica que habría que lograr, o bien en la que habría que insertarse; algo parecido a eso que el doctor Luis Herrera ha llamado nivel de desarrollo de

las ideas.[6] Y en esta difícil pero ineludible tarea, la voluntad política juega un papel primordial.

En un agudo ensayo de Augusto Monterroso, [7] el autor vuelve sobre el tema de la repercusión en América Latina de la emigración de profesionales. A su entender, el debate sobre el robo de cerebros sigue ocultando la necesidad que tienen nuestros pueblos de comenzar a importarlos, y tras ese razonamiento hay una gran verdad. No es utópico, *per se*, considerar dentro de un plan para la vitalización de la actividad científica tercermundista el destinar presupuesto a la contratación de especialistas de primerísima línea que puedan impulsar y enriquecer grupos locales a través de estancias prolongadas en nuestras universidades y centros de investigación. Un estudio cuidadoso de la disponibilidad (o la generación de futura disponibilidad) de fuerza científica propia, capaz de hacer frente y garantizar la continuidad de la experiencia será, asimismo, imprescindible.

Y es que todavía no nos resulta claro, por una tendencia inercial a buscar el éxito donde no está ni puede estar, que lo correcto sería concentrarse en eso, en los cerebros más que en la tecnología a la hora de hacer el balance de las importaciones. Un falso chovinismo —quién sabe si proveniente de los logros nacionales en materia educativa— ha hecho pensar al común de los cubanos que nuestra ciencia se desarrolla vertiginosamente. Falso; salvo honorables excepciones se anda muy a la saga de la frontera del conocimiento, y nunca se estrechará esa distancia como resultado de un proceso puramente económico. Al menos no lo suficiente como para garantizar el llevar a cuentas en algún momento el mejoramiento tecnológico en que se sustenta la economía misma.

MULTIDISCIPLINARIEDAD Y MULTITERRITORIALIDAD

El enfoque de una estrategia de fortalecimiento de la actividad científica fundamental en general, e incluso (y de manera especial) en el área particular de las nanociencias, tendrá que ser por fuerza un enfoque multidisciplinario. En la actualidad las ramas del conocimiento especializado tienen cada vez más puntos en común, y los descubrimientos en una ciencia inciden por lo general con bastante rapidez en las restantes, develando zonas oscuras e impulsando el avance en conjunto. El estudio de temas en principio tan alejados como la teoría cuántica de campos y el comportamiento de biocoloides en medios acuosos implica sorprendentemente un sinnúmero de técnicas matemáticas comunes asentadas en los últimos 30 años. La lista de ejemplos sería muy extensa y develaría a la larga la obligatoriedad de este enfoque. Tiene por otro lado una importancia estratégica inobjetable la diversificación de la actividad científica en la consecución de una intervención socioeconómica futura, pues una economía estable es también diversa, es decir, de forma ineludible deberá estar calzada por una tecnología de amplio espectro.

A este punto ya debe ser bastante evidente que las ideas básicas expuestas, su puesta en marcha, no deben asociarse a un marco político nacional. La enorme consagración social que implica a la dirección política de las naciones subdesarrolladas hace que el esfuerzo por dinamizar la investigación fundamental tenga que ser, de preferencia, multiterritorial.

El número de especialistas, la diversidad temática, el costo de las instalaciones, la estabilidad frente a la migración de profesionales, las maneras de insertarse y de obtener apoyo de organismos internacionales, todos los retos que encara a corto y me-

diano plazos la concreción de esta estrategia son mucho más fáciles de resolver en el ámbito de una cooperación internacional de países tercermundistas. Los frutos, el mayor de los cuales será en el futuro la garantía de continuidad tecnológica propia, son fácilmente compartibles y desarrolladores de todas las economías por igual. Las dificultades se dividirán, la prosperidad se multiplicará. Rara vez se tiene esta bella perspectiva.

Vale la pena mencionar que existen hoy en el primer mundo una cierta cantidad de centros —algunos pertenecientes a la ONU como el ICTP (International Center for Theoretical Physics) a quien la física cubana tiene mucho que agradecer— así como institutos, universidades, etc., que han hecho esfuerzos notables y en muchos casos vitales por el mejoramiento del nivel científico de los países subdesarrollados. Seguramente, y para nuestra suerte, estarán dispuestos a jugar un importante rol en lo que vendría siendo consecución natural de nuestro potencial científico común.

Es claro que calcular la duración de una empresa de semejante magnitud no es elemental; el momento en que se puedan cosechar los primeros avances sólidos en materia económica es difícil de discernir. En cualquier caso, estaríamos hablando de una escala de decenas de años. Por eso, un requisito fundamental tendrá que ser la estabilidad sociopolítica de los países involucrados. Esta simple condición, que hubiera sido impensable tiempo atrás, hoy parece que (al menos en el marco sociopolítico de Latinoamérica) puede ser posible. La cobertura integracionista hacia la cual tiende nuestro continente con pasos claros en lo técnico y lo económico es el genuino punto de partida para un desarrollo científico multidisciplinario y multiterritorial de los países pobres. De esta forma, hacer nanociencia —o cualquier otra ciencia de primer nivel— en Cuba, en Bolivia o en Argentina se identificará con la intención de erradicar de una vez, desde un marco supranacional, la principal dependencia heredada del coloniaje: la científica. Bajo el signo de la integración, puede suponerse que incluso la presión social sobre una estrategia como esta tenga una buena componente de influencia positiva. Sobre esto volveremos.

REDEFINIENDO LA “PROPIEDAD”

El esquema de una sólida integración científicotécnica de beneficio social conlleva un análisis mucho mayor al que es posible realizar en los marcos de este trabajo. Se impone una gran cantidad de debates especializados sobre cada pequeño detalle antes de concluir un plan de acción definitivo. Nos interesa, sin embargo, por su importancia, hacer algunos apuntes sobre el polémico tema de la seguridad científicotecnológica.

La actividad científica fundamental y en mayor medida la aplicación tecnológica de sus resultados está regida, desde el punto de vista legal, por leyes que benefician a los grandes grupos empresariales privados. El intento de un desarrollo científico propio y multinacional necesitará entonces un nuevo marco jurídico que proteja a los sistemas sociales menos aventajados. Ésta será, además, un arma que podrá servir de (relativa) garantía, llegado el caso, ante fluctuaciones indeseables de las condiciones sociopolíticas de los países involucrados en la estrategia.

El referente de licencias públicas como la GNU [8] ha demostrado cómo hacer posible una reglamentación jurídica para el beneficio de muchos. Con vistas a un futuro científico socialmente comprometido son muchas las enseñanzas que pueden aprovecharse de este tipo de licencia. Será necesario, como posición fundamental, regular

la imposibilidad del uso de los frutos de la investigación en cualquier tipo de implementación económico-productiva cuyos fines sean de lucro o que no se revierta en el beneficio social. Ésta es la forma correcta en que la estrategia estaría respaldada legalmente, siendo este respaldo uno de los puntos más sensibles a tratar para que la preserve lo mejor posible de todo lo que pueda afectar a largo plazo el fin propuesto.

Un estudio más profundo habrá que hacer para considerar ideas todavía menos ortodoxas como la liberación pública de las tecnologías (*know how*) bajo reglas análogas a las del software libre. La proposición de revisar esta iniciativa [9] viene de dos motivaciones fundamentales. Por un lado, la posibilidad de desarrollo se abre a todos los países pobres del planeta y no sólo a los impulsores de la estrategia; un hecho que está en la base misma de la intención solidaria y cooperativa del marco sociopolítico de la Latinoamérica actual. Siendo como es el subdesarrollo un problema mundial, se insinuaría una alternativa de avance a países que no podrían formar parte directa del proyecto por no estar hoy en condiciones siquiera de erradicar el analfabetismo. En este sentido, la restricción jurídica al absoluto beneficio social, anteriormente expuesta, brinda la seguridad de que esta apertura influirá sobre ellos únicamente en la dirección correcta.

De otra parte, el fenómeno del software libre ha ilustrado también la increíble fuerza de trabajo que en todo el mundo —y muy en especial en los países desarrollados— es capaz de trabajar unida, movilizadora casi exclusivamente por un espíritu altruista. El nivel alcanzado, fuera de los grandes circuitos comerciales, de diferentes aplicaciones de código abierto como el sistema operativo Linux, es un ejemplo revelador de lo que pueden lograr iniciativas bien orientadas en la era moderna de intercomunicación global. Claramente, la fuerza científica especializada es más escasa y en general está sujeta a leyes y requisitos diferentes a los de los desarrolladores de software. Vale sin embargo la analogía para considerar el atractivo que puede representar, desde el punto de vista personal, y en menor medida institucional, una reglamentación abierta de hondo compromiso social, para la fuerza científica no sólo de la región sino de todo el planeta.

CONCLUSIONES

Las características y problemáticas propias de la investigación cubana en nanociencia devienen generales y mayormente aplicables a todo el quehacer científico de los países tercermundistas. Encarar con seriedad el problema no nos lleva a una particularización localista sino todo lo contrario; la manera singular en que se desarrolla la actividad científica hace que el enfoque correcto sea planteado en términos sociopolíticos de gran envergadura. A este nivel se descubre que en el núcleo de todo el análisis se encuentran las relaciones entre categorías trascendentales como ciencia, tecnología, sociedad, economía y política, así como su evolución en las incómodas condiciones que impone el subdesarrollo.

Como el problema en cuestión radica en la disfuncionalidad científicotecnológica de unas estructuras socioeconómicas diseñadas *a priori* para obtener un papel histórico de soporte y subordinación, la forma en que se debe actuar tendrá que ser completamente nueva. Una comprometida voluntad científica en un marco sociopolítico multinacional parece ser la alternativa que impulse la ciencia tercermundista a los altos niveles en que se encuentra la frontera del conocimiento y la generación de tecnología. En ese punto, y a lo largo del tiempo en el cual que se llega, los procesos

económico-productivos así como los índices sociales serán definitivamente arrastrados en un avance verdaderamente sólido e irreversible.

Todo lo que se necesita para poner en práctica una estrategia científica de estas dimensiones, a saber, estabilidad política, cierto nivel educativo y cultural, etc., existe en la mayor parte de nuestra región, además de una praxis científica modesta pero de aceptable calidad en general.

REFERENCIAS

- [1] Bader, S. D. 2006. *Rev. Mod. Phys.*, 78.
- [2] Kouri, E. 2008. "Womack sobre historia e historiadores". *Temas*, 54.
- [3] Galeano, E. 2003. "Las venas abiertas de America Latina". Casa de Las Américas.
- [4] Informe del Observatorio Nacional de Nanotecnología. 2005. CITMA.
- [5] Rationalis 07. 2007. Memorias del I Taller Pensamiento Racional y Pseudociencia. Facultad de Física, Universidad de La Habana.
- [6] Ubieta, E. 2008. "El camino hacia el éxito está lleno de fracasos". *La calle del medio*, 5.
- [7] Monterroso, A. 2005. *Sobre el robo de cerebros. Fabulaciones y ensayos*. Casa de Las Américas.
- [8] GNU General Public License. www.gnu.org.
- [9] Raymond, E. S. 2000. *The cathedral and the bazaar*. Thyrus Enterprises.

Educación para el futuro: el ingeniero nanotecnólogo

LAURA VIANA CASTRILLÓN*

RESUMEN. En el presente trabajo se identifican las competencias que un ingeniero especialista en nanotecnología debe desarrollar. Se discute el contenido a incluir en el plan curricular para que los alumnos desarrollen dichas competencias y se esboza una propuesta de plan de estudios para la carrera de ingeniería en nanotecnología, en la cual se hace énfasis en la formación científica e integral del estudiante.

PALABRAS CLAVE: nanotecnología, educación en nanotecnología, competencias, plan curricular.

ABSTRACT. This paper identifies the competences for an engineer specialized on nanotechnology. It discusses the content that a curricular plan should have in order to successfully achieve the development of such competences. It also delineates a proposal for a plan of study for the career on nanotechnology engineering, which makes emphasis on the scientific and integral training of students.

KEY WORDS: nanotechnology, nanotechnology education, competences, curricula.

ANTECEDENTES

En México existe una gran brecha entre la investigación básica y el desarrollo tecnológico. En el proyecto Visión 2030, que fuera presentado por el gobierno federal de México en el año 2007, se encuentran plasmadas las metas que se desean alcanzar como país, en el año 2030, así como las estrategias para lograrlo. Dos de esas metas son colocar a México entre el 20% superior de los países en dos rubros: competitividad (en el 2006 se ubicaba en el 46%) y desarrollo tecnológico (en el 45% en 2006). Para lograr estas metas se requiere, entre muchas otras cosas, formar profesionales que tengan una formación científica sólida y, a la vez, una mentalidad de ingeniero, para que puedan utilizar sus conocimientos para modificar el entorno y generar tecnología. Necesitamos modernizar la oferta educativa y formar profesionales capacitados para responder a los nuevos retos que presenta la sociedad, con el objeto de que las brechas entre la investigación y el desarrollo tecnológico en el país y entre México y los países desarrollados no se continúen ampliando.

La nanotecnología es un campo inherentemente interdisciplinario y emergente en el cual se conjuntan la física, la biología, la química, la ingeniería y las ciencias sociales y cuyo objetivo es entender, caracterizar, manipular y explotar las características físicas de la materia a la nanoescala, para generar innovaciones tecnológicas teniendo en consideración su impacto social y ambiental. Se considera como una tecnología clave que aportará un gran desarrollo al siglo XXI y que será el detonante de una nueva re-

* Es coordinadora del posgrado interinstitucional de física de materiales CICESE-UNAM, y, a partir de noviembre de 2006, coordina el proyecto de creación del programa de licenciatura en ingeniería en nanotecnología. laura@unyn.unam.mx

volución industrial, pues las posibilidades de creación de nuevos materiales y dispositivos a partir de átomos y moléculas parecen ilimitadas.

En el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM (CNyN) se advirtió la oportunidad de ofrecer una nueva licenciatura en este tema emergente, ligado a su vocación, por lo que se inició el proyecto de creación de una licenciatura de ingeniería en nanotecnología. Este proyecto ha sido completado en su primera etapa y se encuentra actualmente en proceso de revisión, con la intención de implementarlo en el campus de Ensenada de la UNAM.

La carrera de ingeniería en nanotecnología se diseñó para cursarse en 8 semestres. Su objetivo es formar profesionales con una amplia cultura científico tecnológica y con una serie de herramientas que les permitirán ser competitivos en diversos trabajos o proseguir con estudios de posgrado, teniendo una base formativa sólida, general e interdisciplinaria, además de tener preparación de frontera en el área de las nanociencias y la nanotecnología.

Como parte del trabajo efectuado para diseñar este plan de estudios, se hizo un estudio de factibilidad, se elaboraron los perfiles de ingreso, egreso y perfil profesional que se desean lograr y se describieron las competencias a desarrollar en los alumnos; a partir de esta información, se determinó el contenido curricular. Para tener una visión más amplia, se consultaron planes de estudios de carreras afines en universidades de los Estados Unidos, Inglaterra y Australia. El texto aquí presentado está basado en un trabajo presentado en el 3er foro de Enseñanza de Ciencias Básicas, organizado por la Facultad de Ingeniería de la UNAM y se concentra en el análisis de las competencias que se deberán desarrollar en los alumnos.

ANÁLISIS DE COMPETENCIAS A DESARROLLAR

Antiguamente, las carreras profesionales se concebían básicamente como la impartición de un extenso conjunto de conocimientos. De acuerdo con las tendencias educativas actuales, la planeación curricular debe tener sustento en el desarrollo de las competencias profesionales, ya que es esencial que el alumno, además de adquirir los conocimientos necesarios, desarrolle diversas actitudes, aptitudes y valores que le permitirán desenvolverse en el ámbito profesional de una forma integral, con eficiencia, responsabilidad y oportunidad.

Entre las actitudes y aptitudes a desarrollar en un ingeniero nanotecnólogo, es importante fomentar la responsabilidad social, la conciencia ecológica y el liderazgo. También es esencial, que estos futuros profesionales desarrollen una visión amplia que les permita atacar un problema desde diferentes perspectivas, que adquieran habilidades de trabajo en grupos multi e interdisciplinarios, que cuenten con nociones básicas del funcionamiento de empresas relacionados con diseño, finanzas, planeación, manufactura, etc., teniendo como parámetro la calidad; que tengan habilidades de comunicación, que sean versátiles, innovadores en el desarrollo de productos y servicios y con disposición para utilizar sus conocimientos para desenvolverse en diversos empleos.

Quizá sea evidente que un ingeniero nanotecnólogo debe contar con las actitudes y valores recién mencionados. Sin embargo, no es tan sencillo determinar cuál deberá ser el conjunto de conocimientos que se deberán impartir en un programa de este tipo y cuáles serán las habilidades técnicas profesionales que se deberán desarrollar en los alumnos. La respuesta no es simple, ya que debido al carácter interdisciplina-

rio de la nanotecnología, existe una disyuntiva entre favorecer la profundidad de los conocimientos, con su consecuente especialización, o privilegiar la interdisciplinariedad y la amplitud de éstos. Así, nos enfrentamos a dilemas por resolver, tales como ¿es preferible que los alumnos sepan mucho de poco, o poco de mucho?; si los estudios son demasiado amplios e interdisciplinarios, ¿es posible que los egresados desarrollen habilidades que los conviertan en profesionales aptos para insertarse en el mercado laboral?; si el perfil del egresado es demasiado especializado, ¿será posible que éste encuentre un trabajo adecuado?; ¿cual es el nivel de matemáticas que los estudiantes deben desarrollar?

En otros países del mundo, esta disyuntiva ha sido resuelta de diversas formas. Por ejemplo, los Estados Unidos cuentan con un gran desarrollo tecnológico e industrial y con poder económico, por lo que requieren de personal muy especializado de todos los niveles y diversos perfiles, desde técnicos, hasta personas capacitadas para llevar a cabo investigación y desarrollo tecnológico. En los programas a nivel licenciatura de los Estados Unidos y Canadá se ofrecen módulos de asignaturas relacionadas con la nanotecnología y la nanociencia, como cursos de especialización para alumnos cuya disciplina principal es ciencias de la ingeniería, o ingeniería de materiales. De manera que los egresados tienen una licenciatura central, más general, y cursan un grupo de asignaturas de especialización en nanociencias y nanotecnología. Sin embargo, en esos países la verdadera especialización para investigación básica y desarrollo tecnológico se obtiene a nivel posgrado. Por otro lado, ellos también ofrecen cursos de capacitación técnica en nanotecnología en las universidades comunitarias (Community Colleges, escuelas públicas que típicamente imparten cursos correspondientes a los dos primeros años de nivel licenciatura).

En las universidades de Inglaterra y Australia, los programas de estudios parten de una filosofía diferente, pues ahí han optado por impartir, desde el primer trimestre, asignaturas interdisciplinarias enfocadas exclusivamente en la nanoescala y, por consiguiente, mucho más especializadas. Esta opción es posible de llevar a cabo, debido a que en estos países, los alumnos que ingresan a la universidad tienen una formación muy especializada y de alto nivel, ya que en el ciclo de enseñanza media los alumnos únicamente deben aprobar un número reducido de disciplinas, típicamente 3 (advanced levels “A-levels”, que serían, por ejemplo: matemáticas, física y computación, o matemáticas, química y biología, etc.). Por este motivo, los alumnos extranjeros que provienen de otros sistemas educativos deben cursar un año de materias básicas antes de ingresar al programa.

En nuestro caso, para poder tomar una decisión con respecto a cómo enfrentar esta disyuntiva basados en la situación económica, social y científicotécnica de nuestro país, se llevó al cabo un estudio de factibilidad. Como parte de éste, se analizó el estado actual de la industria en el estado de Baja California y se levantó una encuesta acerca de las necesidades de la industria en Baja California y en Monterrey. Se pudo observar que aunque todo mundo tiene interés y expectativas en el desarrollo de la nanotecnología, las empresas aún no están preparadas para recibir ingenieros nanotecnólogos especializados de manera inmediata.

Con base en estos resultados, se optó por enfocar la enseñanza desde la perspectiva de desarrollo de conceptos y análisis cualitativo, teniendo a las matemáticas como una poderosa herramienta de trabajo práctico, pero sin profundizar demasiado en las derivaciones matemáticas y la formalidad teórica. Por otro lado, se consideró adecuado dar a los alumnos una base amplia de conocimientos científicos, una serie de talle-

res encaminados a desarrollar habilidades de análisis y aplicación de conocimientos para resolver problemas y ofrecerles tres grupos de asignaturas optativas de especialización mayormente enfocadas en las áreas de física (nanoestructuras), química (catálisis ambiental) y biología (biotecnología), respectivamente. Por último y no menos importante, se consideró adecuado impartir a los alumnos un grupo de asignaturas obligatorias que los ayuden a desarrollar herramientas prácticas de comunicación, planeación, manejo de personal, etc., útiles para el trabajo en la industria. De todo esto, hablaremos más adelante.

COMPETENCIAS A DESARROLLAR

A continuación haremos un análisis de las competencias a desarrollar en el ingeniero nanotecnólogo y discutiremos las estrategias para lograrlo. De manera puntual, se identificaron las siguientes:

- Conocerá los principios y manejará las técnicas que le permitan entender, caracterizar, manipular y explotar las características físicas y químicas de la materia a nanoescala.
- Tendrá la habilidad para diseñar experimentos que le den respuestas significativas a sus preguntas. Podrá procesar los datos obtenidos e interpretar los resultados de sus experimentos.
- Entenderá las aplicaciones contemporáneas de la nanotecnología y sus implicaciones sociales desde una perspectiva global y actuará con responsabilidad y espíritu de servicio, basándose en principios éticos, sociales, culturales.
- Comprenderá los posibles riesgos a la salud humana y al medio ambiente provenientes de la exposición a nanopartículas y actuará congruentemente con responsabilidad y ética.
- Tendrá habilidades para trabajar en equipo, en el proceso de investigación, desarrollo, diseño o implementación de nuevos productos, procesos, materiales, dispositivos, sistemas y herramientas relacionados con la nanotecnología.
- Tendrá habilidad para adaptarse a los cambios tecnológicos y una actitud permanente de aprendizaje.
- Comunicará de forma efectiva proyectos o resultados, con claridad y precisión, a través de trabajos escritos o presentaciones orales, en inglés y en español, y hará uso adecuado y eficiente de los recursos tecnológicos y de información.
- Contará con habilidades generales de diseño, planeación, análisis económico y administración, que le permitirán ser competitivo laboralmente.
- Comprenderá los principios y conceptos de la ingeniería y de la nanotecnología y aplicará estos principios para el diseño y análisis con un enfoque de innovación, desarrollo tecnológico y rentabilidad.

PLAN DE ESTUDIOS

El plan de estudios propuesto se diseñó para cursarse en ocho semestres (de 16 semanas), con un mínimo de 345 créditos; con 39 asignaturas obligatorias (295 créditos) y un mínimo de 50 créditos en asignaturas optativas (que corresponden a 7 u 8 asignaturas). La asignación del número de créditos sigue los lineamientos de los

“Acuerdos de Tepic” (ANUIES 1972) que determinan que una hora de clase-semana- semestre para cursos o actividades que requieren trabajo extraescolar corresponde a dos créditos, y en el caso de laboratorios y talleres corresponde a un crédito (8 horas de curso teórico = 1 crédito, 16 horas de laboratorio o taller = 1 crédito). Nos enfocaremos de manera especial en las asignaturas correspondientes a los dos primeros años de estudios (etapa básica), ya que éstas podrían constituir un tronco común para otras licenciaturas en las que se requiera formar ingenieros científicos.

El plan de estudios se divide en asignaturas básicas de tronco común (etapa básica), asignaturas integradoras o profesionalizantes (etapa disciplinaria), asignaturas de competencias profesionales y especialización (etapa de especialización) y asignaturas finales (etapa terminal). Desde el punto de vista de contenidos, el plan incluye asignaturas que propician el desarrollo del estudiante de manera integral, ya que consideran aspectos científicos, humanistas y científicos, todo con una perspectiva teórico-práctica.

Se consideró que durante la etapa básica el estudiante debe adquirir bases sólidas científicas y familiarizarse con el desarrollo actual de la nanotecnología y con el tipo de problemas que ésta puede ayudar a resolver; también debe adquirir una conciencia de su entorno desde los puntos de vista del desarrollo tecnológico, la sustentabilidad, las cuestiones de ética e impacto de la tecnología en la sociedad, etc. Adicionalmente, durante esta etapa el alumno adquirirá habilidades para el manejo de paquetería de software para diseño, cálculo, simulación, presentación de resultados, entre otros, y desarrollará habilidades para la solución de problemas prácticos utilizando los conocimientos formales adquiridos en el aula. También se buscará que el alumno desarrolle la capacidad de expresión oral y escrita, en español, pues se considera que estas habilidades constituyen una herramienta profesional indispensable.

Posteriormente, durante los semestres quinto al octavo, el alumno cursará cuatro tipos de asignaturas: 1) asignaturas integradoras multidisciplinarias, en donde el alumno conjuntará todos los conocimientos adquiridos y los aplicará para entender y manejar técnicas de análisis, síntesis, simulación y manipulación de la materia, con énfasis en aplicaciones tecnológicas; 2) asignaturas teóricas y prácticas de especialización en tres áreas o ejes temáticos, a escoger: biotecnología, tecnología ambiental y nanoestructuras; 3) asignaturas teóricas y prácticas de ingeniería, las cuales aportarán al alumno conocimientos y le ayudarán a desarrollar habilidades de diseño, análisis, planeación, administración, liderazgo empresarial, toma de decisiones, etc., y, 4) talleres de producción oral y escrita en inglés, con objeto de que sea capaz de escribir informes e impartir conferencias en este idioma. Durante el octavo semestre, el alumno realizará una estancia de investigación, trabajando en un problema de investigación relacionado con alguno de los tres ejes temáticos, o hará un estancia en la industria, y elaborará un reporte, lo que le permitirá obtener su grado de licenciatura al finalizar este semestre.

Etapa básica. La etapa básica comprende los primeros cuatro semestres del plan de estudios. Como asignaturas básicas se están considerando aspectos de física, química y biología en niveles y enfoques adecuados y actualizados, además de un extenso estudio de las matemáticas cuyo objetivo es contribuir a la formación lógico deductiva del estudiante y a facilitarle una herramienta que le permita modelar algunos fenómenos de la naturaleza. Adicionalmente, se incluyen asignaturas de carácter formativo que ayuden al desarrollo integral del estudiante. A continuación, dividiremos las asignaturas por grupos dependiendo del área de conocimiento y explicaremos de forma sucinta sus objetivos generales.

Matemáticas. Dentro de las asignaturas básicas obligatorias de matemáticas hemos considerado las siguientes: cálculo I y II, álgebra lineal y geometría analítica, métodos matemáticos I y II, probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería, con un total de 272 horas de teoría (desarrollo analítico) y 272 horas de talleres. Cada uno de los cursos consta del mismo número de horas de teoría y de taller. El objetivo de los talleres es incorporar el uso de paquetería de software de matemáticas y graficado, como una poderosa herramienta matemática y un lenguaje de programación interactivo que ayude al alumno a visualizar los temas vistos en la clase de teoría y resolver problemas matemáticos (graficación, álgebra simbólica y programación básica para simulación, por ejemplo, MatLab, Simulink y Symbolic Math). Esta habilidad le permitirá diseñar, desarrollar e implementar herramientas computacionales y gráficas para la solución de problemas de ciencias e ingeniería. Es importante que los talleres sean impartidos por un profesor diferente al que imparta la teoría, con objeto de que los aspectos analíticos y de uso de paqueterías de software reciban la misma atención.

TABLA 1. Asignaturas obligatorias del área de matemáticas

Semestre	Denominación de la asignatura	Modalidad	Tipo de asignatura		Créditos
			Horas/semestre		
	Teóricas		Prácticas		
1º	Cálculo I	Curso, taller	48	48	9
1º	Álgebra lineal y geometría analítica	Curso, taller	32	32	6
2º	Cálculo II	Curso, taller	48	48	9
3º	Métodos matemáticos I	Curso, taller	48	48	9
3º	Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería	Curso, taller	48	48	9
4º	Métodos matemáticos II	Curso, taller	48	48	9
Total			272	272	51

Física. Como asignaturas obligatorias de física, correspondientes a la etapa básica, tenemos: mecánica clásica, calor, ondas y fluidos, electromagnetismo y óptica. Cada una de estas asignaturas consistirá de una parte teórica, en la cual aprenderán las leyes físicas y los métodos de razonamiento y resolución de problemas (total 256 hrs), y un laboratorio (total 128 hrs), en el cual adquirirán la habilidad de diseñar y llevar a cabo experimentos que les permitan encontrar respuestas a sus preguntas. Finalmente, dado que los problemas de libro de texto distan mucho de los problemas reales, se han incluido tres talleres que informalmente denominaremos *de aterrizaje*, cuyo objetivo es que el alumno utilice sus conocimientos formales como herramienta para analizar y buscar soluciones a problemas reales. En estos talleres, se desarrollarán herramientas y habilidades como son el análisis dimensional, la estimación de órdenes de magnitud, el manejo de unidades, la búsqueda de soluciones prácticas,

la discusión y el trabajo en equipo, y la práctica de utilizar sus conocimientos para el análisis de situaciones de la vida diaria. El número total de créditos en física básica es de 46.

TABLA 2. Asignaturas obligatorias del área de física, dentro de la etapa básica

Semestre	Denominación de la asignatura	Modalidad	Tipo de asignatura		Créditos
			HORAS/SEMANA		
	Teóricas		Prácticas		
2º	Mecánica clásica	Curso, laboratorio	64	32	10
2º	Temas selectos de mecánica clásica	Taller	0	32	2
3º	Calor, ondas y fluidos	Curso, laboratorio	64	32	10
3º	Temas selectos de calor, ondas y fluidos	Taller	0	32	2
4º	Electromagnetismo	Curso, laboratorio	64	32	10
4º	Temas selectos de óptica y electromagnetismo	Taller	0	32	2
4º	Óptica	Curso	64	32	10
Total			256	224	46

Química y biología. Como asignaturas obligatorias de las áreas de química y biología, tenemos: química general, sistemas biológicos, química de compuestos orgánicos y bioquímica I. Todos los cursos consisten de una parte teórica y un laboratorio, con un total de 256 horas teóricas y 128 horas prácticas (40 créditos). En los laboratorios se buscará que los alumnos aprendan las técnicas experimentales y adquieran destreza en el diseño de experimentos.

TABLA 3. Asignaturas obligatorias de las áreas de química y biología, en la etapa básica

Semestre	Denominación de la asignatura	Modalidad	Tipo de asignatura		Créditos
			Horas/semana		
	Teóricas		Prácticas		
1º	Química general	Curso, laboratorio	64	32	10
1º	Sistemas biológicos	Curso, laboratorio	64	32	10
2º	Química de compuestos orgánicos	Curso, laboratorio	64	32	10
3º	Bioquímica I	Curso, laboratorio	64	32	10
Total			256	128	40

Asignaturas complementarias de la etapa básica. Los objetivos globales de este grupo de materias son mantener a los alumnos actualizados en los temas de la nanotecnología (aspectos técnicos, científicos, sociales, éticos, legales, etc.) y fomentar en ellos valores como la responsabilidad social, la conciencia ecológica y el liderazgo. Es necesario que los alumnos se percaten de que el conocimiento avanza a una gran velocidad, que se preparen para adoptar una actitud permanente de aprendizaje y que estén alertas a las oportunidades. Por otro lado, es indispensable que los alumnos desarrollen habilidades de comunicación y expresión, ya que consideramos que éstas son esenciales para un profesionista que desea desarrollarse en un ámbito de competencia. Por lo anterior, durante esta etapa se incluyen talleres de producción escrita y producción oral, en español, y, a la par, se implementará un programa personalizado de enseñanza del idioma inglés, sin créditos, bajo la supervisión del Centro de Enseñanza de Lenguas Extranjeras de la UNAM.

TABLA 4. Materias obligatorias complementarias, correspondientes a la etapa básica

Clave	Denominación de la asignatura	Modalidad	Tipo de asignatura		Créditos
			horas/semana		
	Teóricas		Prácticas		
1º	Ingeniería, nanotecnología y sociedad I	Curso	32	0	4
1º	Producción escrita (español)	Curso, taller	32	32	6
2º	Ingeniería , nanotecnología y sociedad II	Curso	32	0	4
2º	Expresión oral (español)	Curso, taller	32	32	6
3º	Ética para ingenieros	Curso	32	0	4
4º	Desarrollo sostenible	Curso	48	0	6
4º	Análisis económico en ingeniería	Curso	48	0	6
Total			256	64	36

ETAPAS SUBSECUENTES

Aunque en este trabajo nos hemos enfocado en las asignaturas que corresponden a la etapa básica, o lo que podría considerarse como un tronco común de la carrera, quisieramos, por completar la información, esbozar el resto de las asignaturas que hemos considerado. Haremos este análisis en términos de las diferentes etapas.

Asignaturas integradoras profesionalizantes o avanzadas (etapa disciplinaria). Esta etapa tiene lugar durante los semestres 5^º al 8^º. Durante este periodo el alumno cursará tres tipos de asignaturas: 1) asignaturas integradoras multidisciplinarias en donde el alumno conjuntará los conocimientos adquiridos y los aplicará para entender y manejar técnicas de análisis, síntesis, simulación y manipulación de la materia con énfasis en aplicaciones tecnológicas, lo cual le permitirá generar competencias laborales; 2) asignaturas teóricas y prácticas de carácter ingenieril, las cuales aportarán

al alumno conocimientos y le ayudarán a desarrollar habilidades de diseño, análisis, planeación, administración, liderazgo empresarial, toma de decisiones, etc., y 3) talleres de expresión oral técnica y redacción de textos científicos en inglés (con créditos). Esta etapa consta de 106 créditos obligatorios e incluye las siguientes asignaturas: fundamentos de física moderna, electrónica básica, nanomateriales I y II (síntesis y caracterización), microscopías y espectroscopías I y II (barrido y transmisión), ingeniería de materiales I y II, procesos industriales, relaciones laborales y organizacionales, evaluación de proyectos de inversión, inglés técnico I y II (producción oral y escrita). Esta etapa consta de 106 créditos obligatorios.

Después de haber cursado las asignaturas integradoras, durante los semestres 5º al 7º, el alumno habrá desarrollado habilidades para el trabajo a escalas nanométricas de simulación, diseño, síntesis, caracterización, manufactura, aplicaciones, etc. y habilidades para su desempeño como ingeniero. También, habrá adquirido herramientas útiles para su desempeño, tales como el desarrollo de un razonamiento estadístico y el conocimiento de la probabilidad y estadística aplicadas en el contexto de la ingeniería, la comprensión de la metodología involucrada en los procesos industriales, la evaluación de proyectos de inversión, conocimientos de relaciones laborales y organizacionales, ingeniería de materiales, etc. A la par de las asignaturas integradoras, el alumno cursará materias de especialización de su elección, en alguno de los ejes temáticos previstos, las cuales se mencionan a continuación.

Asignaturas optativas de especialización (etapa de especialización). Las asignaturas de especialización son asignaturas teóricas, prácticas y teóricoprácticas que se agrupan alrededor de tres ejes temáticos: biotecnología, tecnología ambiental y nanoestructuras. El estudiante deberá cursar un mínimo de 50 créditos optativos.

Las asignaturas del grupo de biotecnología buscan dar al alumno las bases de la biotecnología moderna, con especial énfasis en las aplicaciones de la nanotecnología en este campo; consisten en las siguientes: bioquímica II, laboratorio de microbiología, biocatálisis, biología molecular, biomateriales I y II, aplicaciones de la bionanotecnología.

Las asignaturas del eje de tecnología ambiental, además de dar al alumno las bases generales de la ingeniería ambiental, buscan incorporar en su contenido los avances recientes de la nanotecnología; son las siguientes: fisicoquímica, manejo y control de desechos contaminantes, química ambiental, química de materiales, introducción a la ingeniería ambiental I y II y procesos catalíticos.

Las asignaturas del eje de nanoestructuras buscan dar al alumno los fundamentos científicos que le permitan comprender los desarrollos tecnológicos relacionados con la nanotecnología en campos importantes como el desarrollo de nanodispositivos, la nanoelectrónica, computación cuántica, etc.; son las siguientes: física de sistemas de baja dimensionalidad I y II, introducción a la cristalografía, métodos computacionales, nanodispositivos, fuentes alternativas de energía y nanoestructuras de carbono.

Es importante resaltar que, aunque todas las asignaturas de los tres ejes de especialización tienen una componente muy importante de nanotecnología, se buscó que aportaran a los estudiantes conocimientos y una visión más general que les permita desempeñarse en trabajos no centrados en la nanotecnología.

Etapa terminal. Finalmente, tenemos la etapa terminal que incluye las asignaturas que permitirán al alumno poner en práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de sus estudios, al participar activamente en un problema de investigación y o llevar al cabo una estancia en la industria, y reportar sus resultados de forma verbal y escri-

ta. Al final de esta etapa, el alumno deberá haber escrito una tesina requerida como una de las opciones de titulación. Esta etapa consta de 16 créditos obligatorios consistentes en las asignaturas de estancia de investigación o estancia en la industria e introducción a la investigación,

CONCLUSIONES

Como mencionamos a lo largo del presente trabajo, es importante que el alumno, además de adquirir los conocimientos necesarios, desarrolle diversas actitudes y aptitudes fundamentales para su desarrollo profesional. En este trabajo, hemos presentado una propuesta de plan de estudios basada en el desarrollo de competencias. Para que tengamos éxito en alcanzar el desarrollo de las competencias aquí mencionadas, es necesario que el contenido de las actas descriptivas de los cursos establezca claramente los objetivos a lograr y que se mencionen de forma explícita actividades específicas de reto intelectual, formativas, de análisis, discusión, trabajo en equipo, para que los estudiantes aprendan a pensar, argumentar, reflexionar y decidir con responsabilidad y que sean capaces de hacerlo de forma autodidacta. Consideramos que el programa propuesto puede adaptarse para ser considerado como base para conformar un tronco común para algunas disciplinas de la ingeniería en la que la formación de carácter científico es importante.

BIBLIOGRAFÍA

- Memorias del 3er Foro Nacional de Ciencias Básicas*. 2009. 22 al 24 de abril, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Revista de la Educación Superior*. 1972. ANUIES, vol. 1, núm. 4, octubre-diciembre.
- Shapter, J.G., Hale, P., Maddox, L.M., Ford M.J., Waclawik E.R. 2004. "Enseñanza de la nanotecnología a estudiantes universitarios", *Journal of Materials Education*, vol. 26 (3-4): 191-200
- Wriedt Runne, Karin. 2008. *Guía operativa para la elaboración, presentación y aprobación de proyectos de creación y modificación de planes y programas de estudio de licenciatura*, UNAM.
- Proyecto "Visión 2030" del Gobierno Federal. 2007. En <http://www.vision2030.gob.mx>.

NANOTEHCNOLOGY LEGAL ASPECTS*

DE PATRICK BOUCHER

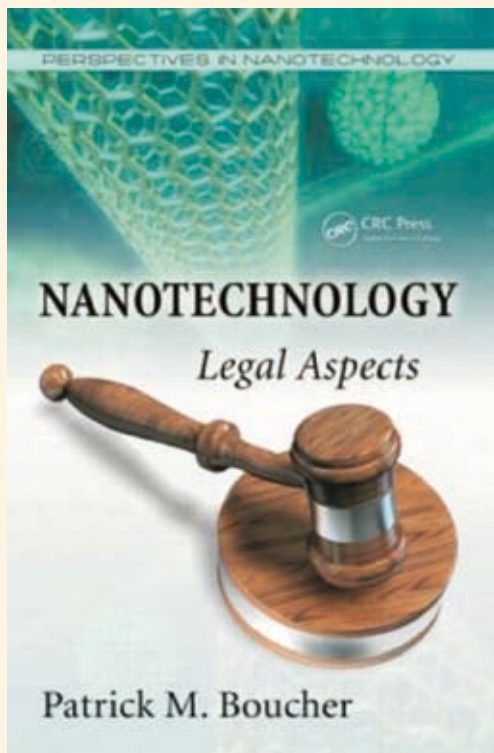
POR GIAN CARLO DELGADO RAMOS**

El trabajo de Boucher, publicado por CRS Press (EUA, 2008), es una referencia para comprender las diversas aristas que componen lo legal, tanto en lo que se refiere a la propiedad intelectual; la regulación de la nanotecnología en sus diversas implicaciones ambientales y a la salud; así como en relación con los aspectos legales de las responsabilidades.

Si bien el libro está escrito desde una perspectiva estadounidense, muchos de los argumentos son generalizables aunque, para aquellos interesados en aspectos puntuales para otros países, sobre todo en materia de regulación, resulta necesario complementar la lectura con otras que cubran las especificidades de cada país, tanto en términos generales como particulares. Es decir, tanto en quién regula y bajo qué marco legal se opera para reglamentar diversos aspectos ambientales, de salubridad o de seguridad laboral, hasta qué aspectos específicos se han o se requieren implementar para el desarrollo y estímulo responsable de las nanotecnologías.

El libro se divide en tres grandes temáticas:

- 1) propiedad intelectual, particularmente patentes [requisitos, funcionamiento de las oficinas de patentes, clasificación, violaciones] y derechos de autor [características, utilidad y funcionalidad en lo “nano”];
- 2) regulación [agencias encargadas, ejemplos de regulación de la nanotecnología en la salud, lo ambiental, las exportaciones, así como sobre el control político y judicial de las agencias encargadas de regular] y,
- 3) responsabilidad [quién es responsable, qué leyes pueden aplicarse, aplicabilidad de la negligencia, responsabilidad objetiva y garantía de los productos nano, uso criminal de la nanotecnología, prevención y detección].



* *Aspectos legales de la nanotecnología.*

** Investigador del programa “El Mundo en el Siglo XXI” del Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es integrante del Sistema Nacional de Investigadores. Contacto: giandelgado@unam.mx

A continuación se presentan y comentan algunos argumentos que se consideran relevantes:

- *Aspectos legales de la propiedad intelectual de la nanotecnología*

Los instrumentos legales, entendidos como aquellos que permiten modelar el comportamiento de la sociedad, pueden ser categorizados a groso modo en dos: los que promueven ciertos comportamientos que se asumen como positivos y los que castigan aquellos inaceptables o indeseables.

En el entendido de que en la modernidad el desarrollo científico y tecnológico es por lo general asumido como deseable, se han establecido, desde la instauración formal del sistema capitalista de producción y más precisamente desde la primera revolución industrial, una serie de medidas para regular, estimular y proteger los intereses directa o indirectamente involucrados en su avance.

En primera instancia, se procura proteger el conocimiento generado de tal suerte que se reconozca(n) y beneficie(n) al(los) inventor(es) sin afectar o limitar, en la medida de lo posible, el propio avance científicotecnológico de interés (incluyendo el militar).

En el proceso de licenciamiento existen, entre otros elementos, consorcios especializados en patentes (pool patents) o fórmulas de licenciamientos cruzados, cuando, por ejemplo, una innovación hace uso de varias invenciones previas para dar fruto a una tercera. En ese contexto existe la posibilidad de escenarios de “extorsionismo de patente”,¹ algo evitable con un buen conocimiento en el área, pero no siempre previsible —advierte Boucher.

Con todo, la piratería es tal vez el principal punto de la acometida legal, puesto que desde

tal estructura jurídica se intenta evitar el uso de conocimientos o innovaciones sin reconocimiento, permiso y/o remuneración alguna. Desde luego, ha de precisarse —aunque Boucher no lo indique— que el esquema posibilita el mantenimiento, en cierto modo, de las asimetrías de innovación/dependencia tecnológica existentes. Ello se logra, por ejemplo, mediante la reprobación a la ingeniería en reversa y la consecuente prohibición de la copia o “piratería”² de tal o cual producto.

Y es que si bien se entienden los argumentos antipiratería, lo que llama la atención es la propia historia del desarrollo tecnológico de los actores que la condenan. A decir de Chalmers Johnson, pionero en materia de “capitalismo asiático”, todos los países desarrollados (EUA, Inglaterra, Japón, etc.) en su momento se hicieron ricos del mismo modo:

...independientemente de qué tan justificadas eran sus políticas, en la práctica concreta, protegieron sus mercados domésticos usando altas barreras tarifarias y barreras no tarifarias al comercio [...] Todos estos países mendigaron, compraron y robaron tecnología de punta avanzada a países innovadores y luego aplicaron ingeniería en reversa y dirigieron sus recursos para mejorarla. Usaron el poder del Estado para apoyar y proteger a sus capitalistas nacionales que tenían el potencial de convertirse en exportadores.³

Así, el sistema mundial de propiedad intelectual, si bien tiene su lado positivo en el sentido de que reconoce el trabajo innovador; está, sin embargo, diseñado para velar esencialmente por los intereses de los que lo han desarrollado; de ahí que se establezcan estructuras de castigo u otro tipo de “candados” legales que la mayoría de

¹ El *extorsionismo de patente* alude a la acción de ciertos actores que patentan procesos básicos con el único objeto de cobrar por su licenciamiento sin, en ningún momento, estar vinculados directamente en algún proceso productivo que haga uso de tal patente.

² Es interesante que se utilice este término, pues recuerda que el pirata era aquel que, a diferencia de los corsarios, robaba en los mares sin permiso de la corona. Lo problemático no es si se roba o no se roba, sino quién se beneficia con ello y por tanto si se otorgan o no permisos por parte de las elites o grupos de poder establecidos.

³ Johnson, Chalmers (2004). *The sorrows of Empire*. Metropolitan. Nueva York, EUA: 263.

las veces limitan el acceso a avances tecnológicos clave por parte de países en desarrollo u otros “actores menores” o científica y tecnológicamente débiles. Es claro, desde luego, que cuando se habla de nichos tecnológicos de frontera, las posibilidades de colocarse en una posición favorable están siempre abiertas, aunque las ventajas son claras para los países con un fuerte aparato científicotecnológico. Esto no excluye la posibilidad de “golpes de suerte” por parte de cualquier actor, incluso de uno “pequeño”.

Considerando lo anterior, la necesidad de discutir los aspectos legales de la nanotecnología no sólo responde a la regulación y manejo deseable de un nuevo frente tecnológico desde una perspectiva aplicable a toda tecnología, sino, sobre todo, a la identificación de cuestiones específicas que precisan de reflexiones, herramientas y medidas *ad hoc*. Boucher ciertamente contribuye con este acometido.

De entrada, por ejemplo, el autor destaca la interrogante de si es o no patentable un objeto que existe a escala macro o micro y que ahora se hace a nivel nano, dígame un motor y un nanomotor; o un automóvil y un nanoautomóvil; o aún más complejo, si en realidad hay diferencias mayores entre un sistema-micro-electro-mecánico (MEMS) y un sistema-nano-electro-mecánico (NEMS). En ambos casos lo relevante —desde lo legal-jurídico— no es la respuesta en sí misma, sino el hecho de si las leyes actuales, dígame de patentamiento, se sostienen y contienen los elementos necesarios para expresar, responder, resolver y hacer operativos los retos y paradigmas que impone la nanotecnología.

Se acentúa el caso de las patentes pues son relevantes aunque ciertamente no los únicos instrumentos de protección a la propiedad intelectual. En íntima vinculación y sinergia, destacan los derechos de autor que permiten, entre otras cuestiones, excluir a los demás de reproducir el trabajo. Éstos requieren cumplir con requisitos como “prueba” o memoria tangible de la idea,

“originalidad” y “creatividad”. Suelen ser derechos de mayor duración que los de las patentes, mismos que sólo protegen los aspectos *funcionales* de la invención. Por ejemplo, los derechos de autor se han establecido en el caso de la literatura científica y de divulgación, en objetos de nano-arte o nano-escultura u otros tipos de manifestación de creatividad tangible como pueden ser los patrones de nanocircuitos y que pueden ser reconocidos, a la usanza de los patrones de circuitos integrados (micro), como *mask works* (Boucher, 2008: 59-60).

Otros son los secretos industriales que permiten, por ejemplo, mantener oculta la información clave de los procesos y técnicas de producción, dígame de nanomateriales (*i.e.* nanotubos) al prohibir a los actores involucrados, por razón de fuertes sanciones, revelar fragmentos o la totalidad de tal información en cualquier medio.

Pero, regresando al caso de mayor interés, el de las patentes, debe entonces considerarse que las invenciones sujetas a tal proceso deben ser “nuevas” y no “obvias”. Pueden ser procesos, máquinas, artículos manufacturados o una estructura de material diseñada. No son patentables las leyes naturales, los fenómenos físicos y las ideas abstractas. En principio, tampoco lo es la naturaleza (la vida), a menos que ésta haya sido modificada o diseñada por el ser humano por medio de, por ejemplo, la biotecnología o la nanobiotecnología (diseño de nuevos materiales o sistemas útiles para tal o cual fin sobre la base del cruce de materia orgánica e inorgánica).

Las patentes deben incluir dos partes centrales: una descripción escrita y un conjunto de pruebas y argumentos. El lenguaje empleado, conceptos, ejemplos y demás contenidos de la solicitud de patente son altamente relevantes pues normalmente son elementos decisivos tanto para la aprobación o rechazo de la misma, como para explorar la posibilidad de hacer (mal) uso de la innovación, sin pago alguno producto de “huecos” o “fallas” en su preparación.⁴

⁴ No debe olvidarse que todo el sistema es operado por humanos, que el lenguaje es limitado (más cuando se trata de nuevos fenómenos), y que los evaluadores no son especialistas y tienden a estar sobresaturados de trabajo y presionados por el tiempo que pueden dedicar a cada solicitud. Desde luego, también hay corrupción. Todo esto es en uno u otro modo argumentado por el autor.

Aún más, en el caso de las nanopatentes surge un problema específico: el hecho de que los conceptos o términos y sus significantes pueden transformarse con el tiempo; en el caso de la nanotecnología en el corto plazo dado que es un nicho nuevo, en consolidación y por tanto altamente cambiante.

Uno de estos aspectos puede ser tan elemental como la definición de qué es y qué no es un nanomaterial o un sistema nanométrico patentable (aquí se inserta la discusión de los nanomateriales diseñados y los existentes en la naturaleza, dígame una nanopartícula de carbono, producto de la combustión de carbón). Para EUA y Europa, después de un debate por varios años, éstos han sido definidos como menores a 100 nanómetros. La Oficina Europea de Patentes (EPO) lo expresa así:

[...] el término nanotecnología cubre entidades con un tamaño geométrico controlado de al menos uno de sus componentes funcionales por debajo de los 100 nanómetros, sea en una o más dimensiones, y susceptibles de producir efectos físicos, químicos o biológicos intrínsecos a ese tamaño. Incluye el equipo y métodos para controlar el análisis, manipulación, procesamiento y medición con una precisión por debajo de los 100 nanómetros (www.epo.org/topics/issues/nanotechnology.html).

Otra dificultad del proceso de protección de la propiedad intelectual ha sido la localización de patentes en las bases de datos mundiales. Y es que el concepto de “nanotecnología” es relativamente nuevo (propio de la década de 1990 en adelante),⁵ lo que sin embargo no significa que antes no hubiera manipulación y avances científico tecnológicos a esa escala —denominada entonces como “muy pequeña”. Justo por ello, vale precisar, la EPO estableció *etiquetas* que inten-

tan resolver lo anterior y que también permiten catalogar la amplitud de aplicaciones de un nicho altamente interdisciplinario. Así, el código Y01N que alude a nanotecnología se subdivide en varias subcategorías (www.espacenet.com/index.en.htm). En EUA, la *clasificación 977* de nanotecnología cuenta con más de 250 subclasificaciones (www.uspto.gov/web/patents/classification/uspc977/sched977.htm).

Una traba adicional a lo anterior, más aguda hace algunos años que hoy día, es cómo cada evaluador de solicitudes de nanopatentes define el área temática y las etiquetas correspondientes. Al no ser normalmente especialistas en el área, cuya característica es la interdisciplina, debe apoyarse en muy buena medida en el propio solicitante de la patente. El resultado puede ser no del todo apropiado debido a problemas de comunicación u otros, por lo que consecuentemente las búsquedas posteriores sobre antecedentes en tales o cuales aplicaciones puede ser incompleta. En este tenor, para el caso de EUA se especifica que el 30% de nanopatentes entran en el rubro de “invenciones eléctricas”, 26% en el de “invenciones biotecnológicas”, 23% en el área de “química”, y 21% como “invenciones mecánicas” (p. 21).

Por tanto, con elevados números de nanopatentes, día a día en aumento, es clave el trabajo cruzado de las distintas oficinas de propiedad intelectual —advierte Boucher. Más cuando se sabe que el tiempo de aprobación/rechazo de una patente toma entre 3 a 6 años a lo que se suma el usual retraso que hay en la evaluación de solicitudes.⁶ La velocidad de obtención de una patente y su eventual validación en las principales oficinas de patentes del mundo es pues crucial, ya que puede poner en juego fuertes inversiones y ganancias a futuro (tal es la lógica del sistema de mercado).

A todo lo anterior, súmense también las medidas extraordinarias que operan cuando se

⁵ El concepto fue empleado por primera vez por el japonés Norio Taniguchi en 1974. Fue popularizado por Eric Drexler en 1986 mediante la publicación de su libro *Engines of creation*. Desde fines de los ochenta, pero sobre todo ya en la década de los noventa, es cuando el concepto es empleado de modo generalizando.

⁶ El retraso en la examinación de patentes en EUA por parte de la Agencia de Propiedad Intelectual y Marcas Registradas (USPTO), con todo y su ejército de unos 5 mil evaluadores, rondó las 100 mil patentes según datos de 2006. Ese año la USPTO recibió 440 mil solicitudes y alcanzó a evaluar sólo 332 mil (p. 19).

trata de innovaciones nanotecnológicas sensibles, como las de uso militar y de inteligencia. Como advierte Boucher (p. 23), si el secreto es impuesto en una solicitud de patente, se abren varias ramificaciones. Tal vez lo más obvio —agrega— es el hecho de que se prohíba la divulgación de la información: ésta no será publicada y no se permitirá revelar la información por medio de otros canales, incluyendo llenar contrapartes de solicitudes en otros países cuyos gobiernos luego podrían tener acceso a dicha información clasificada (p. 23).

El proceso se hace al igual que el resto de patentes pero está a cargo de evaluadores aprobados por el aparato de seguridad estatal respectivo. Se trata pues de un dispositivo que, si bien Boucher no lo precisa, en los hechos bloquea cualquier mecanismo de manejo social de las aplicaciones nanotecnológicas militares o en ciertos casos duales (pero de tipo estratégico). El asunto no es menor pues al menos cerca de la tercera parte del gasto mundial en nanotecnología se adjudica a investigaciones de tipo militar.

A lo señalado, debe sumarse la complejidad que resulta de la regulación de las exportaciones, fundamentalmente como producto del carácter restrictivo del acceso a la información. Esto es muy claro nuevamente en el caso de tecnología militar o dual, típicamente sujeta a su clasificación —en EUA, una función exclusiva del Ejecutivo. Según Boucher, “no hay la menor duda de que actualmente existe información relacionada con la nanotecnología que esté sujeta a restricciones de clasificación” (p: 130). Esto lleva a sostener que existe una incompatibilidad, y por tanto tensión, entre las diversas restricciones que hay a cierto tipo de información y, consecuentemente, a las exportaciones de productos que hacen uso de tecnología clasificada por un lado, y el sistema de patentamiento que obliga a la divulgación de las invenciones, por el otro (p. 139).

• *Regulando la nanotecnología*

Los instrumentos legales también sirven para definir regulaciones enfocadas a incentivar líneas de investigación y/o desincentivar otras, a establecer lineamientos de calidad, certificación y

de responsabilidades y de eventuales sanciones, sean éstas producto de un mal uso (deliberado) de la tecnología o por fallas del propio sistema científico tecnológico, mismas que pudieron o no ser calculadas con antelación.

El responsable de tal regulación es el Estado, el cual específicamente opera desde diversas estructuras encargadas de lo ambiental, la salud, la seguridad laboral, la calidad de los productos y, por tanto, de la seguridad del consumidor, entre otras cuestiones.

El autor hace, en tal sentido, una revisión de las diversas agencias responsables de la regulación existente y potencial de la nanotecnología en Estados Unidos, entre las que están la US Food and Drug Administration (FDA) y sus diversos centros y oficinas de investigación y operación (para más referencias sobre la regulación en EUA, véase: www.regulations.gov).

Para el autor, una de las cuestiones relevantes tiene relación con las implicaciones que involucra el tema de cómo clasificar los diversos productos nanotecnológicos en el sentido de definir la jurisdiccionalidad de la multiplicidad de entidades que componen tales agencias. Esto es algo crítico para la definición de la cobertura que tendrá tal o cual regulación (p. 107). Lo complejo —agrega— es que la nanotecnología de modo natural hace borrosas algunas de las bases que dan fundamento a la distinción entre diferentes clasificaciones que fueron desarrolladas para propiedades y comportamientos de la materia a escala macroscópica (p. 108), y que son con las que hasta ahora han operado las agencias gubernamentales como la FDA, pero también la Environmental Protection Agency (EPA), entre otras.

Por ejemplo, en lo referente a la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act), el autor argumenta que entre las posibilidades de acción, se puede considerar la aplicación de restricciones en la liberación de nanopartículas en cuerpos de agua, siempre sobre la base de fundamentos científicos razonables. El problema —comenta Boucher— es que tales fundamentos han sido poco estudiados y establecidos, lo que sugiere ser, tal vez, uno de los principales retos de la mencionada Ley y por tanto de la EPA. Lo mismo puede decirse para entes homólogos en otros países.

Acciones similares se discuten para el caso de la Ley de Agua Segura para Beber (Safe Drinking Water Act) y la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) pero en el sentido de la necesidad de tomar conocimiento y en su caso medidas para garantizar que las fuentes de abastecimiento de agua potable no estén contaminadas con nanomateriales o que el aire no tenga concentraciones de nanopartículas en concentraciones peligrosas o tóxicas para la salud y el medio ambiente (pp. 115 y 117). En ese sentido —según Boucher— es necesario desarrollar criterios más concretos, es decir, normas y clasificaciones que permitan establecer límites puntuales sobre la presencia de nanomateriales específicos en el medio ambiente. (p. 17).

Uno de los retos de lo anterior es que los nanomateriales tienden a tener una trascendencia temporal. Dicho en otras palabras, su presencia tiende a cambiar rápidamente debido a sus diminutas dimensiones. Ello complejiza la capacidad de obtener una contabilidad precisa sobre la presencia de tales o cuales nanomateriales, cuestión que a su vez dificulta el establecimiento de normas o estándares y la evaluación de su cumplimiento (p. 118). Complicaciones similares, entre otras, se pueden encontrar en el proceso de estandarización internacional de la nanotecnología en el marco del grupo de trabajo TC 229 de la International Organization for Standardization (véase: www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=381983).

A lo anterior se suma el hecho de que muchas de las regulaciones sobre la calidad del aire o del agua son limitadas en el espacio pues un país puede regular la presencia de nanomateriales pero, si los países vecinos no lo hacen, puede igualmente verse afectado (muchas veces, incluso a decenas de kilómetros de distancia de la zonas fronterizas).

Otra regulación de relevancia es la que alude al control de los niveles de trazas de pesticidas en los alimentos y que ahora tendrá que considerar, al menos los niveles de trazas de ciertos nanomateriales que sean utilizados en pesticidas u otro tipo de agroquímicos de contacto directo, e incluso indirecto (hoy día, ya llama la atención el potencial uso de nanopartículas de plata y de

dióxido de titanio). En EUA, esto deberá ser contemplado por la Ley de Protección de la Calidad de los Alimentos (Food Quality Protection Act).

Asimismo, la regulación sobre desechos es relevante y Boucher aboga por el uso de las regulaciones existentes cuando los nanomateriales son incorporados en productos de desecho que ya son controlados como materiales peligrosos. No obstante, apunta a la necesidad de nuevas regulaciones cuando los nanomateriales conforman nuevos tipos de desechos. Para ello, se requiere de estudios confiables sobre el grado y tipo de toxicidad de los mismos, pues las propiedades pueden cambiar. No sólo en tanto a materiales que en la macroescala no son tóxicos pero que a la nanoescala son tremendamente reactivos, sino incluso al revés, materiales que a la macroescala son tóxicos y que a la nanoescala disminuyen su toxicidad. Si lo último fuera el caso, debe advertirse que se perderían de vista importantes aplicaciones que minimizarían el impacto de sustancias tóxicas que hoy en día utilizamos, desde productos de limpieza hasta agroquímicos (pp. 123-124).

En cualquier caso, la regulación de desechos debe, por supuesto, considerar la posibilidad de su reciclaje.

A las precisiones anteriores, vale añadir que, independientemente de si un país desarrolla y se posiciona fuertemente o no en el avance nanotecnológico, lo que es un hecho desde el punto de vista del que escribe, es que precisamente por el potencial de este frente tecnológico, el Estado debe desarrollar mecanismos de vigilancia que le permitan regular constructiva y positivamente diversos aspectos, incluyendo el comercio de nanoproducidos, sean éstos nacionales o importados. Y es que éstos serán también eventualmente nanodesechos. Esto es clave para países como México en donde hoy día ya hay cientos de nanoproducidos en el mercado.

Ahora bien, ante la necesidad de cómo regular los aspectos medioambientales de la nanotecnología, Boucher precisa que en buena medida la regulación de los mismos es de carácter especulativo pues muchos de los impactos específicos todavía no se conocen o se entienden del todo. En ese sentido, el autor se pregunta hasta

qué punto existe el peligro de que la regulación pueda ser invocada demasiado pronto, resultando por tanto en una regulación inapropiadamente restrictiva. Pero también de que la regulación se retrase demasiado y por tanto sea costosa y difícil de remediar. (p. 128). El meollo del asunto está pues en cómo hacer un balance de estos dos extremos.

Para muchos especialistas, esto se alcanzaría con el uso del principio precautorio⁷ pues tal dilema no es algo nuevo en el quehacer político de cara al avance científico tecnológico tal y como lo documenta el informe Lecciones tardías de alertas tempranas: el principio de cautela, 1896-2000 de la Agencia Europea de Medio Ambiente (disponible en: www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22/Issue_Report_No_22.pdf).

De modo similar, en *Risk and Uncertainty*, un informe del Comité Nacional de Ética de la Investigación de Noruega, se considera una visión desde la ética que es sugerente: “el reto ético no es aquel que se asume como la responsabilidad que sirve para evadir que pase cualquier daño. Eso es imposible. Sin embargo, dado que puede haber situaciones en que la comunidad científica da cuenta de que sus actividades pueden llevar a consecuencias desconocidas y no intencionales, la comunicación se torna más importante debido a que el incremento de la transparencia en los procesos del manejo del riesgo implica que la incertidumbre científica se tornará un asunto de regulación política, escrutinio público y debate. El reto ético es entonces aquel de la transparencia y el que estimula la investigación sobre dichas consecuencias” ([www.etikkom.no/Documents/Publikasjoner-som-PDF/Risk%20and%20Uncertainty%20\(2009\).pdf](http://www.etikkom.no/Documents/Publikasjoner-som-PDF/Risk%20and%20Uncertainty%20(2009).pdf)).

Por lo arriba indicado, se puede argumentar que el encuentro entre innovación tecnológica y política obliga a la toma de decisiones, en este caso de “buena” gobernanza de la nanotecnología. Eso supone la necesidad de un escena-

rio transparente y abierto en el que se conozca y se entienda el conocimiento científico y tecnológico por parte de diversos actores sociales con el propósito de encauzar del mejor modo posible la nanotecnología.

Y es que parece claro que el grado en el cual la nanotecnología será regulada, tal y como sí advierte Boucher, dependerá en buena medida de numerosas variables relacionadas con cómo es públicamente percibida. Eso se debe sobre todo a que las entidades reguladoras —según asume el autor— son en muchos sentidos susceptibles a la presión que pueden generar las demandas públicas para regular (p. 141). Lo relevante del punto es que de no asumirse un diálogo transparente y abierto, el resultado podría ser innecesariamente costoso.

- *Nanotecnología y la definición de responsabilidades.*

No hay duda —escribe Boucher (p. 155)— de que, conforme evolucione la nanotecnología, no solamente habrá beneficios sino también riesgos y afectados. Considerando esto y desde el punto de vista legal, la definición de responsabilidades es algo que será en consecuencia cada vez más relevante, pues la doctrina de responsabilidad tiene fuertes implicaciones en el comportamiento de la gente. Nótese que la doctrina no es una forma de regulación gubernamental que dicte normas específicas de conducta sino más bien un sistema de sanciones de gobierno que promueve cierto raciocinio a la forma en la que la gente interactúa (p. 175).

La flexibilidad de la doctrina de negligencia hace que uno pueda aplicarla a casi todas las esferas de la nanotecnología. El asunto es que resulta peligroso incluso tratar de hacer una lista de las áreas en las que podría ser aplicable pues ésta sería necesariamente incompleta. Así pues, la habilidad de que la doctrina sea aplicable dependerá solamente de la capacidad de la gente

⁷ El principio precautorio se asume como aquel que establece medidas para evadir o minimizar daños cuando se está en situaciones en las que la actividad humana pudiera llevar a daños moralmente inaceptables y que son científicamente posibles pero inciertas.

de demostrar que otros se han comportado de modo imprudente (p. 161).

Uno de los casos más acalorados al respecto es el que gira en torno a los parámetros que definen las malas prácticas médicas. En ese tenor, la nanomedicina entra automáticamente en tal contexto conflictivo, así se vuelve sujeta a posibles acusaciones de negligencia. Esta última, sin embargo, debe ser probada en cuanto a la responsabilidad y a la violación de la misma por parte de los nanotecnólogos que desarrollaron tal o cual innovación, así como por parte de los médicos que la utilizan. Al mismo tiempo, en tanto a las causalidades y los daños (p. 162).

El objetivo es reparar los daños ocasionados, proceso que se torna complejo cuando hay que dar un valor monetario a cuestiones que se miden en otros valores, como la pérdida de una función vital o incluso de la vida, mencionar dos. A pesar de ello, las aseguradoras logran operar dentro de un marco legal-regulatorio.

La nanotecnología, sin embargo, trae consigo una dificultad peculiar, su complejidad hace intrincado el proceso de definir grados de responsabilidades por negligencia. Ello se debe no sólo a cuestiones científico técnicas que están todavía en estudio o que requieren mayor experiencia, sino además —como explica Boucher— al hecho de que un daño puede ser resultado de una combinación de factores, por ejemplo, la negligencia puede ser causa de un nanomedicamento *per se* en un 40%; del uso de un producto convencional en un 25%; del uso un segundo producto convencional en un 15%; y por error del paciente (o culpa concurrente) en un 15% (p. 172). Definir esos porcentajes es justamente lo que es altamente complejo.

En cualquier caso —indica Boucher— lo claro es que la falla de tal o cual tratamiento es resultado “de los límites tecnológicos de la humanidad”, es decir, “sea simplemente porque no entendemos lo suficiente sobre la respuesta fisiológica de cuerpos humanos individuales como para predecir ciertas reacciones adversas, o la tecnología, tal y como está, aún incluye riesgos o complicaciones inherentes” (p. 173).

La negligencia, sin embargo, sólo se sustenta cuando se prueba que la acción de un actor

ha sido irresponsable y, por tanto, en un grado u otro, deliberada. Si un médico hace uso de un nanotratamiento sobre la base de la experiencia y los protocolos conocidos y aun así hay daños, la negligencia no puede ser legalmente establecida. Es por ello crucial que en el proceso de avance de la nanomedicina, los pacientes sean bien informados acerca de los efectos adversos conocidos, los potenciales riesgos y del estado real del conocimiento científico tecnológico (o de cuáles son los vacíos existentes). En fases iniciales, se debe comunicar también que los tratamientos carecen de estudios sobre los posibles efectos adversos de largo plazo; que los estudios han tenido un espectro limitado (aplicados sólo a una parte pequeña de población, a grupos de cierta edad y sexo; para identificar sólo algunos riesgos específicos; etc.); que los médicos son inexpertos en tanto a la administración de nanotratamientos, entre otros aspectos (p. 174). La falta de este tipo de comunicación puede llevar a procesos legales complejos y ciertamente costosos —advierte Boucher.

Algo similar puede argumentarse en relación con la responsabilidad sobre los nanoproducidos en general (y no solamente los resultantes del avance de la nanomedicina). Se trata de un aspecto relevante, pues la propia historia muestra casos sorprendentemente costosos como el de los asbestos cuyas consecuencias se identificaron en el mediano largo plazo después de numerosos casos de afectados.

A diferencia de la responsabilidad en el ámbito de la práctica médica, la responsabilidad se enfoca al producto *per se* en el sentido de que una responsabilidad con el consumidor no fue cumplida: los asbestos no son seguros para la salud pues se astillan en los pulmones generando cáncer. Como consecuencia, la industria enfrentó y sigue enfrentando numerosas demandas. Hasta fines de la primera década del siglo XXI, había unas 700 mil demandas contra unas 8 mil industrias fabricantes de asbesto o de productos que lo incluían. El cálculo estima unos 10 mil millones de dólares de inversión perdidos y cientos de empresas quebradas. El cierre del caso de los asbestos se estima que totalizará un total de 3 millones de demandas y más de 300 mil millones de dólares en compensaciones (pp. 179-180).

La experiencia de los asbestos —indica Boucher— debe ser recordada y aprendida para minimizar los costos de productos innovadores de los cuales se sabe poco. En ese sentido, la responsabilidad en los nanoproductos debe entonces vigilarse en tanto a 1) posibles defectos de diseño; 2) posibles defectos de manufactura y, 3) posibles defectos en las advertencias sobre el producto que resulten, en cualquiera de los tres casos, en afectaciones al consumidor.

Respecto al tercer punto, el de las advertencias, cabe precisarse que el papel que juegan es la relativa transferencia de la responsabilidad hacia el consumidor, de ahí que ser explícito en las mismas (y, por tanto, de los riesgos previsibles) es útil para definir claramente las responsabilidades de las partes, la del productor y la del consumidor. Esto es aplicable incluso para el caso de productos que usualmente son entregados al consumidor por la vía de un intermediario calificado como lo es el caso de los médicos y ciertos medicamentos. El lenguaje empleado en las advertencias de los productos también es algo que debe considerarse según sea el caso, si el producto va directamente al público en general o si se canaliza por la vía de un intermediario calificado.

Finalmente, Boucher indaga brevemente en las implicaciones de las responsabilidades con respecto al negocio, observando que una de las razones por las cuales el grueso de nanoproductos salen de corporaciones y en mucho menor medida de pequeños emprendedores se debe, desde la perspectiva legal y el riesgo, a que la figura de la corporación permite limitar la carga financiera de eventuales responsabilidades a los activos de la empresa, protegiendo así el patrimonio individual de los socios, accionistas o dueños. Y es que la corporación en términos legales tiene una “personalidad” jurídica que le permite tener derechos y obligaciones similares a los de las personas físicas. Esto, desde luego, lleva a pensar en los aspectos éticos y morales sobre cómo en realidad opera la corporación, en particular en cómo asume la responsabilidad de sus productos y/o servicios y cómo se puede hacer legalmente válida esa responsabilidad cuando hay afectados. Ello sobre todo porque hoy día

la maraña de fusiones e intercambios de acciones entre compañías hace difícil identificar claramente a todos los responsables.

Más aún, los aspectos éticos se extienden a la posibilidad, como ha sucedido con otras tecnologías, de truncar resultados o evaluaciones en el nombre de aumentar las ganancias o reducir los gastos. Esto para el caso de la nanotecnología —escribe Boucher— podría suceder en la forma de la alteración deliberada de protocolos de prueba de los productos antes de salir al mercado; del vertido de nanodesechos en formas y/o lugares prohibidos por una eventual regulación; la violación de normas de seguridad en la transportación de nanomateriales; el uso deliberado de tales o cuales nanomateriales a pesar de tener conocimiento sobre sus efectos tóxicos debido a que los resultados en los productos son increíbles; entre otras acciones (p. 218).

Esta probable situación exige pues una serie de regulaciones que desde el punto de vista de Boucher, al menos en su mayoría, ya existen, pues se trata de aspectos que no son específicos a la nanotecnología sino al comportamiento y a las motivaciones por parte de los actores que la desarrollan. Tal vez lo que sí caracteriza a la nanotecnología es que los potenciales crímenes serán, prácticamente en el grueso de casos, sobre la base de capacidades colectivas y no individuales, pues la complejidad de la nanotecnología difícilmente permite que un solo individuo logre construir dichas capacidades. Una de las cuestiones que debe preocupar a las corporaciones en ese sentido —precisa Boucher— es la plausibilidad de acciones criminales por parte de sus empleados, mismas que podrían arrastrar a la propia corporación a eventuales procesos judiciales en su contra, con consecuencias y costos mayores, sobre todo de cara a las cada vez más exigentes penalizaciones que por lo menos existen en Estados Unidos y Europa (p. 222).

• Consideración final

Tomando nota de todo lo anterior, parece que la necesidad de regular la nanociencia y la nanotecnología es bastante clara a estas alturas de su todavía temprana etapa de desarrollo. Si bien,

desde el punto de vista de Boucher, el proceso de regulación será un ir y venir, a modo de péndulo, entre acciones legales que relajen y por tanto estimulen el avance de la nanotecnología, y aquellas que tensen ciertos aspectos ante eventuales riesgos (pp. 237-238); vale advertir que en el ir y venir siempre cabe la posibilidad de cálculos erróneos o imposibles de prever con costos de diversa magnitud. De ahí, pues, la necesidad, como se indicó, de introducir instrumentos que ayuden al manejo social de la nanotecnología por la vía de la aplicación razonable del *principio precautorio*, el estímulo del diálogo transparente y abierto, y la constante información del público en general, incluyendo a los hacedores de políticas públicas.

El libro de Boucher, entre otras fuentes, deberían verse desde la mirada de países como México, y en especial de sus entidades gubernamentales responsables de regular, como fuertes llamados de atención para promover la información y formación de personal especializado, pero sobre todo para impulsar al mismo tiempo un dialogo abierto, un debate amplio y acciones propias que procuren consolidar una innovación nanotecnológica encauzada y responsable. El tiempo que el Estado falle en ello será el tiempo que continuará un desarrollo nanotecnológico desregulado en un contexto de crecientes productos “nano” llegando a los espacios de producción y al mercado. Tal panorama es social y ecológicamente indeseable y, lo que es más, podría ser altamente costoso, tanto en términos económicos, como políticos.

LIBROS E INFORMES

NANOMEDICINE. NANOTECHNOLOGY FOR HEALTH

EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM. COMISIÓN EUROPEA. BRUSELAS, BÉLGICA

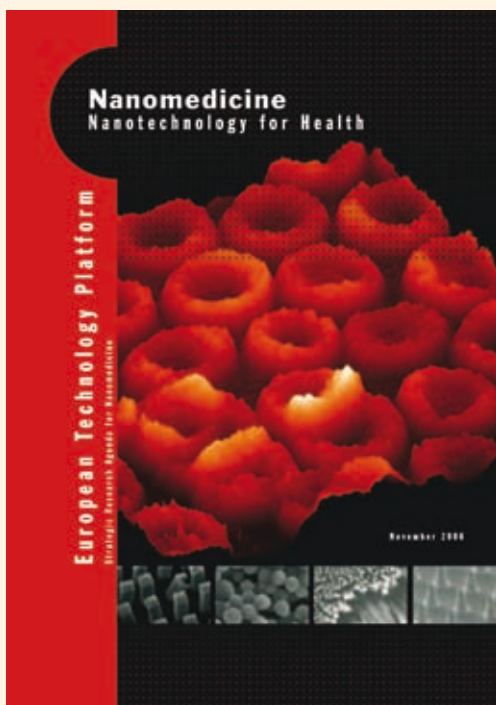
NOVIEMBRE DE 2006. 39 PP.

Las aplicaciones nanotecnológicas en la medicina prometen numerosas posibilidades para mejorar la diagnosis y las terapias, permitiendo una mejor calidad de vida en los pacientes y sus familiares. Al mismo tiempo, la nanomedicina es estratégica para el desarrollo de Europa, razón por la cual se llama a coordinar esfuerzos entre la Comisión Europea, la industria y la academia. Para ello, se ha conformado una Plataforma Tecnológica Europea en Nanomedicina.

Lidereaada por un consorcio de industrias, entregó, en septiembre de 2005, una visión común para el desarrollo de esta área tecnológica denominada: Agenda Estratégica de Investigación.

La agenda, que se presenta en este informe, tiene por objeto impulsar las decisiones políticas necesarias para el estímulo y financiamiento de las áreas prioritarias por medio de la identificación de necesidades y retos, tecnologías existentes, y futuras oportunidades. Toma también en consideración algunos aspectos relacionados con la educación, el entrenamiento de profesionales, las necesidades éticas, la evaluación de beneficios y riesgos, la aceptación del público, el marco regulatorio y la propiedad intelectual.

La prioridad fijada parte de parámetros como la tasa de mortalidad, el nivel de sufrimiento que una enfermedad impone al paciente, la carga puesta a la sociedad, la prevalencia de enfermedades y el impacto que puede tener la nanotecnología en el diagnóstico y superación de las mismas.



Se exploran los beneficios de la interdisciplinariedad y convergencia de tecnologías relevantes para el desarrollo de innovaciones en el área de diagnóstico, de sistemas de entrega inteligente de drogas y de medicina regenerativa.

§

Disponible en:

ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanomedicine_bat_en.pdf.



§

Para un antecedente de este documento, léase también: *European Technology Platform on NanoMedicine. Nanotechnology for Health*. Comisión Europea. Bruselas, Bélgica. Septiembre de 2005. 37 pp. (Disponible en: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/nanotechnology/docs/nanomedicine_visionpaper.pdf).

NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA:

LA CONSTRUCCIÓN DE UN MEJOR MUNDO ÁTOMO POR ÁTOMO*

NOBORU TAKEUCHI

FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. 2009. 142 PP.

Dirigido al público en general, *Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mundo mejor átomo por átomo* es un libro de divulgación científica, en donde, en la introducción, se describe de manera sencilla un relato histórico de cómo ha evolucionado la ciencia para dar origen a la nanociencia y a la nanotecnología. Además, pone a nuestro alcance conceptos físicos que hacen posible visualizar la constitución de la materia, explicando primero cómo son los átomos y cómo se forman las moléculas, para guiarnos así hacia la descripción de la materia. A través de sus páginas nos habla de manera accesible tanto de la física clásica como de la cuántica, hasta llevarnos a una fácil comprensión de la analogía entre un átomo y un átomo artificial.

Uno de los puntos importantes es que el lector, sin requerir de conocimientos científicos profundos, conozca qué son y cómo se pueden obtener los sistemas nanoestructurados. Los términos técnicos como pozos, alambres y puntos cuánticos se pueden entender sin dificultad. En general, la descripción de los sistemas nanoestructurados es tal que permite avanzar sin problema alguno hacia las secciones donde se explican las múltiples, y en algunos casos las posibles, aplicaciones de los nanosistemas. Por citar una de entre las varias de estas últimas que se mencionan está aquella que se refiere a la industria electrónica.

Desde mi perspectiva, es un excelente libro donde se nos brinda la oportunidad de acercarnos y aprender, sin necesitar lecturas adicionales sobre nanociencia y nanotecnología; y donde



más consultas sólo harán falta si el lector está avido por adquirir mayor profundización sobre este tema en particular.

Gregorio Hernández Cocoltzi**

* Colección la Ciencia Para Todos. Fondo de Cultura Económica / Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

** Instituto de Física, Universidad Autónoma de Puebla, Apartado Postal J-48, Puebla 72570, México.

OUT OF THE LABORATORY AND ONTO OUR PLATES.

NANOTECHNOLOGY IN FOOD & AGRICULTURE

MILLER, GEORGIA Y SENJEN, RYE

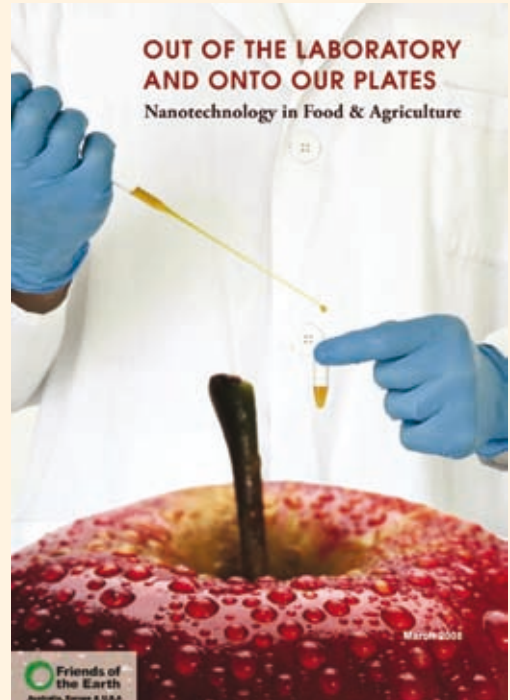
FRIENDS OF THE EARTH. MARZO DE 2008. 63 PP.

En la ausencia de un etiquetamiento obligado de debate público o de leyes que garanticen su seguridad, diversos productos que utilizan nanotecnología han entrado a la cadena de la alimentación. Nanopartículas manufacturadas, nanoemulsiones o nanocápsulas ahora se encuentran en agroquímicos, alimentos procesados, empaques, cuchillerías y tablas para picar. Friends of the Earth ha identificado 104 de esos productos; no obstante, el número seguramente es mucho mayor. Y es que en general las empresas no están dispuestas a precisar abiertamente el uso de nanomateriales en sus productos.

Muchos estudios preliminares sobre algunos nanomateriales que se están usando en la industria de los alimentos sugieren la posibilidad de introducir nuevos riesgos a la salud y al medio ambiente pues podrían ser tóxicos en un grado u otro. Y dado que no hay ninguna regulación que exija el etiquetamiento de los productos, los consumidores no tienen la opción de comer libres de nanotecnología.

La nanotecnología también impone nuevos retos para el desarrollo de sistemas de producción agrícola más sustentables. En momentos en que las ventas de comida orgánica están aumentando, la nanotecnología aparece sugiriendo un fortalecimiento de nuestra dependencia en tecnologías química y energéticamente intensivas.

Por tanto, dado los potenciales riesgos a la salud y el medio ambiente, así como por las implicaciones sociales asociadas, Friends of the Earth aboga por una moratoria en la comercialización de productos alimenticios, empaques y otros materiales de contacto con los alimentos, y agroquímicos que contengan nanomateriales manufacturados, hasta que no se establezcan leyes específicas sobre la seguridad de la nanotec-



nología y hasta que el público sea involucrado en la toma de decisiones. En ese sentido, agrega, los nanomateriales deben ser considerados nuevas sustancias, lo cual implica que requieren de nuevos estudios y evaluaciones de toxicidad / biocompatibilidad como prerrequisito para su liberación comercial.

§

Disponible en:

www.debatpublic-nano.org/_script/ntsp-document-file_download.php?document_id=246&document_file_id=392.

NANOTECHNOLOGY IN AGRIFOOD SECTOR.

MARKET REPORT

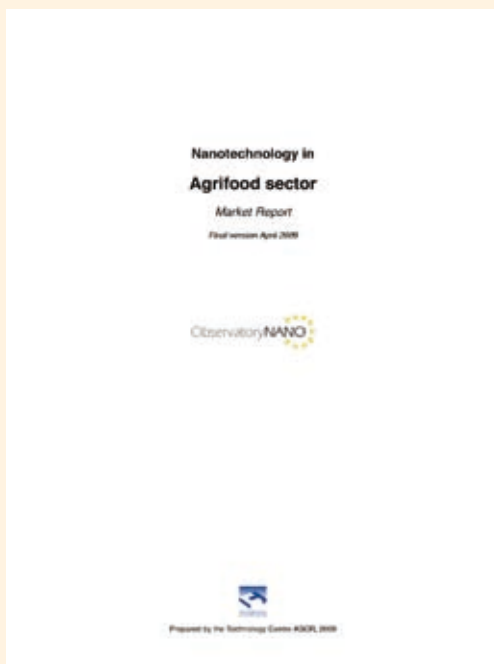
OBSERVATORY NANO. TECHNOLOGY CENTRE ASCR. ABRIL DE 2009. 44 PP.

El informe se enfoca en el potencial del mercado de las aplicaciones nanotecnológicas en la industria de los alimentos, sus principales directrices y limitaciones. Cuatro aplicaciones son analizadas: 1) los sistemas de encapsulación para una liberación controlada de aditivos, ingredientes y saborizantes, 2) los sistemas de entrega de suplementos nutricionales o nutraceuticals; 3) empaquetamiento de alimentos con base en composites de nanoarcillas (PET multicapas); 4) materiales de contacto para alimentos basados en la introducción de nanopartículas metálicas o de óxidos metálicos.

Según el estudio, más de 400 empresas alrededor del mundo están activas hoy en día en investigación y desarrollo de aplicaciones nanotecnológicas y su número, se estima, pasará a unas mil empresas en el transcurso de la próxima década. El éxito de tales aplicaciones dependerá —precisa el informe— tanto de la seguridad de las mismas, como de su percepción pública.

§

Disponible en: www.observatorynano.eu/



NANOTECHNOLOGIES AND FOOD

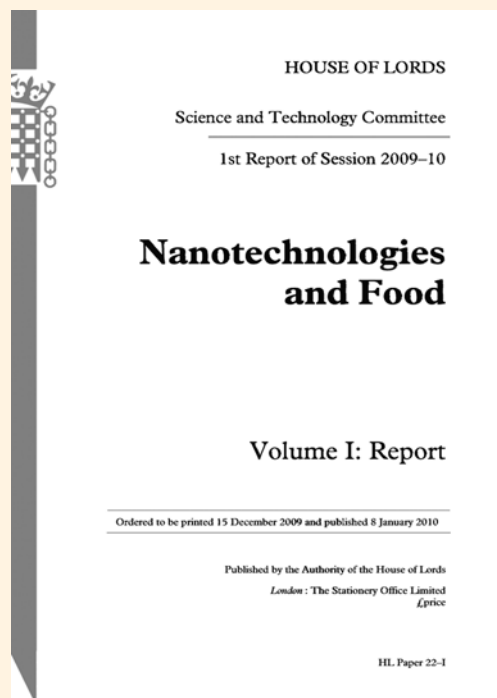
SCIENCE AND TECHNOLOGY COMMITTEE. HOUSE OF LORDS

LONDRES, INGLATERRA. 2010 (VOL. 1, 112 PP.; VOL. 2, 372 PP.)

El informe, realizado por el Comité de Ciencia y Tecnología de la Cámara de los Lores, evalúa diversos aspectos sobre el uso de la nanotecnología en la industria de los alimentos, pues se considera pudieran haber ciertas preocupaciones. Y es que la actitud del público sobre los alimentos está influenciada por una diversidad de factores, como lo son el miedo a riesgos nuevos, el nivel de confianza en la regulación, así como otros factores sociales y psicológicos. Sin embargo, como otras tecnologías, la nanotecnología bien podría ofrecer a los consumidores y a la sociedad un número de beneficios —precisa el informe. El propósito es, por tanto, dilucidar si las nanotecnologías en realidad tienen un papel valioso en el sector alimentario; si existen sistemas efectivos para garantizar que los consumidores estén conscientes y protegidos contra cualquier riesgo potencial; y para entender y evaluar algunas preocupaciones que el público pudiera tener acerca de estas nuevas tecnologías.

La comunicación amplia, efectiva y transparente es esencial dadas las sensibilidades del público en relación con las nuevas tecnologías en los alimentos, razón por la cual estamos preocupados —argumenta el estudio— al ver que la industria es renuente a hablar sobre sus actividades en el área de las nanotecnologías por su inquietud acerca de la posible reacción de la gente. Se propone cambiar esta situación mediante un mayor diálogo con la industria, así como crear una lista de productos o aditivos alimenticios que contengan nanomateriales en el marco de la Agencia de Estándares de los Alimentos.

En su primer volumen, el reporte incluye secciones sobre aplicaciones nanotecnológicas en el sector agroindustrial; sobre riesgos a la salud y la seguridad; sobre la cobertura de la actual re-



gulación en el Reino Unido; sobre mecanismos de fortalecimiento de la regulación, así como de aquellos de comunicación con el público. En el segundo, se presentan las evidencias científicas de lo anteriormente argumentado.

§

Parte 1 disponible en:

www.publications.parliament.uk/pa/ld200910/ldselect/ldsctech/22/22i.pdf.

Parte 2 disponible en:

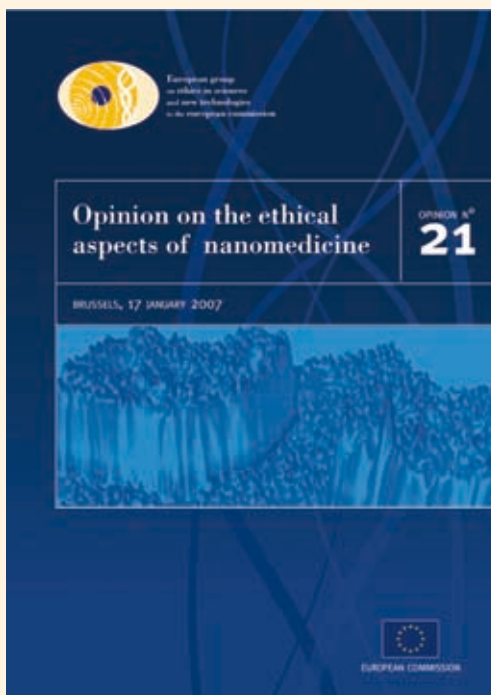
www.publications.parliament.uk/pa/ld200910/ldselect/ldsctech/22/22ii.pdf.

OPINION ON THE ETHICAL ASPECTS OF NANOMEDICINE

GRUPO EUROPEO EN ÉTICA DE LA CIENCIA Y LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DE LA COMISIÓN EUROPEA. BRUSELAS, BÉLGICA. ENERO DE 2007. 164 PP.

El informe subraya la importancia vital de dar cuenta de las preocupaciones existentes en relación con la seguridad de los avances en nanomedicina (y, de hecho, de la nanotecnología en general). Sugiere establecer medidas para verificar la seguridad de los productos de la nanomedicina y para asegurar que los dispositivos médicos sean evaluados adecuadamente en relación con la salud pública. Para ello, las instituciones existentes encargadas de la seguridad de los pacientes y los ciudadanos, deberían ahora hacerse también cargo de las implicaciones de la nanomedicina. En ese sentido, se observa necesario evaluar adecuadamente los riesgos a nivel nacional y a nivel de la Unión Europea. Asimismo, se requiere que los actores involucrados dediquen esfuerzos convenientes para entender y prevenir riesgos que pudieran estar asociados a la nanomedicina. En lo que respecta a la participación del público, la transparencia es esencial para que éste confíe en la nanotecnología, por lo cual se proponen iniciativas para desarrollar encuestas sobre la percepción del público acerca de los beneficios y riesgos de las aplicaciones nanotecnológicas. Eventos académicos y debates públicos sobre problemáticas y posibilidades en el futuro cercano de la nanomedicina son también deseables.

El informe aboga por el establecimiento de evaluaciones prospectivas de la tecnología, incluyendo sus aspectos e implicaciones sociales, éticas y legales.



§

Disponible en:
http://ec.europa.eu/european_group_ethics/activities/docs/opinion_21_nano_en.pdf.

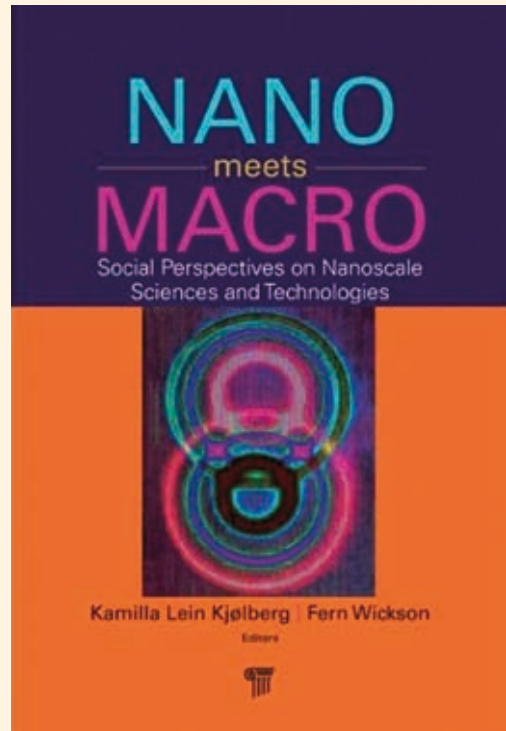
NANO MEETS MACRO. SOCIAL PERSPECTIVES ON NANOSCALE SCIENCES AND TECHNOLOGIES
KJOLBERJ, KAMILLA Y WICKSON, FERN
PAN STANFORD PUBLISHING. 2010. 567 PP.

Este libro explora la enorme diversidad de perspectivas sociales en el surgimiento de las ciencias y tecnologías en nanoescala. La diversidad se presenta en cuatro secciones o nodos de interés donde lo nano encuentra lo macro: 1) en el hacer; 2) en el ojo público; 3) en las grandes preguntas y, 4) en las decisiones difíciles.

El volumen ha sido diseñado especialmente para su uso en la docencia interdisciplinaria y en discusiones con estudiantes de las ciencias naturales y exactas; pero la riqueza de asuntos y perspectivas abordados lo hace de interés para investigadores, practicantes y no académicos con interés en leer una introducción sobre las perspectivas sociales en las ciencias y tecnologías en nanoescala.

El libro incluye una sección de imágenes de ciencia ficción y artes visuales así como preguntas de reflexión al final de cada capítulo.

De los temas abordados, se pueden mencionar, por ejemplo, los siguientes capítulos: "Contexto histórico de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de EUA" (H. Fogelberg); "Cuestionando la interdisciplinariedad: qué roles tienen los laboratorios sustentados sobre la ciencia social?" (R. Doubleday y A. Viseu); "La ciencia y la política de las nanoimágenes" (R. Strand y T. Birkeland); "La naturaleza resbalosa del nanoentusiasmo" (R. Sparrow); "nanotecnología y sustentabilidad global: el caso del manejo del agua" (M. W. Kamara); "Nanotecnología en alimentos: entendiendo la respuesta pública a sus riesgos y beneficios" (L. Frewer y A. Fischer); "Mejorando la naturaleza material" (A. Nordmann); "Humo que fulmina? Riesgo, confusión y marcos regulatorios" (D. Bowman y G. Van Calster); "Aspectos económicos y políticos de la gobernanza de la na-



notecnología en América Latina: el caso de México" (G. C. Delgado); "Tratando las nanopartículas con precaución: reconociendo la incertidumbre cualitativa en los análisis científicos del riesgo" (F. Wickson, F. Gillund y A. I. Myhr) y, "Sociedad civil y la política de las tecnologías convergentes a la nanoescala" (H. Shad), entre otros más.

§

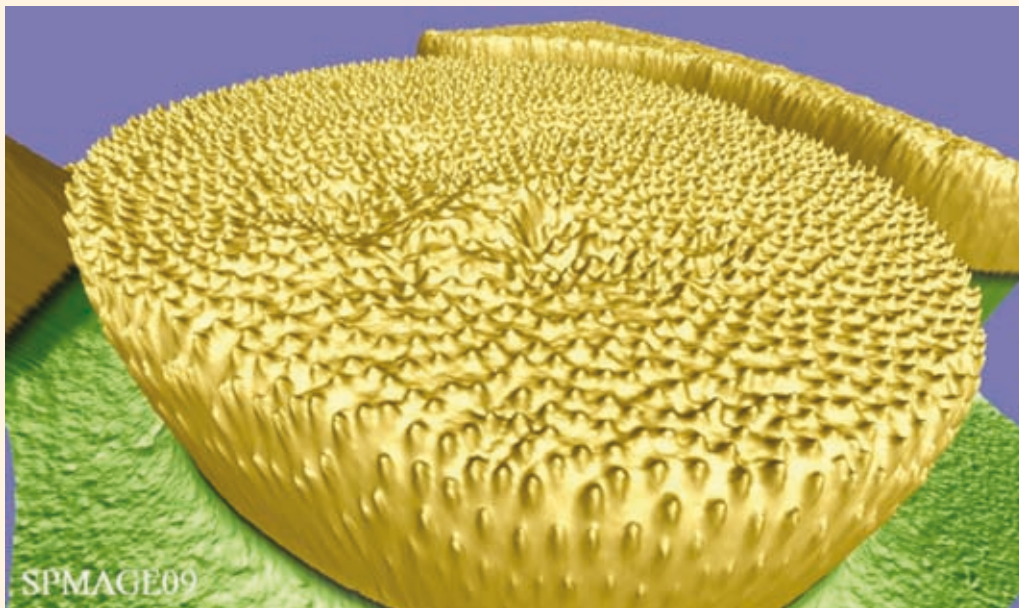
Véase: www.panstanford.com.

INTERNATIONAL SCANNING PROBE MICROSCOPY IMAGE PRIZE, 2009

▼ 1er Lugar

Células rojas infectadas de malaria humana (*plasmodium malariae*)

Autor: Li Ang, National University of Singapore (Singapur)



LA IMAGEN MUESTRA LA SUPERFICIE DE UNA CÉLULA ROJA INFECTADA CON EL PLASMODIO DE LA MALARIA, LA CUAL ESTÁ CUBIERTA DE DENSOS PATRONES DE BACHES. ESOS BACHES (*BUMPS*) SON RACIMOS (*CLUSTERS*) DE LA PROTEÍNA DEL PARÁSITO EXPORTADOS A LA SUPERFICIE DE LA CÉLULA ANFITRIÓN. EL DIÁMETRO DE SU BASE ES SÓLO DE 50 NANÓMETROS Y SU ALTURA MENOR A 10 NANÓMETROS.

AVISO IMPORTANTE:

HACEMOS UNA EXTENSA INVITACIÓN A PARTICIPAR EN ESTA NUEVA SECCIÓN, ENVIÁNDONOS SUS IMÁGENES CON UNA BREVE EXPLICACIÓN DE LA MISMA. SE ACEPTAN COLABORACIONES TODO EL AÑO.

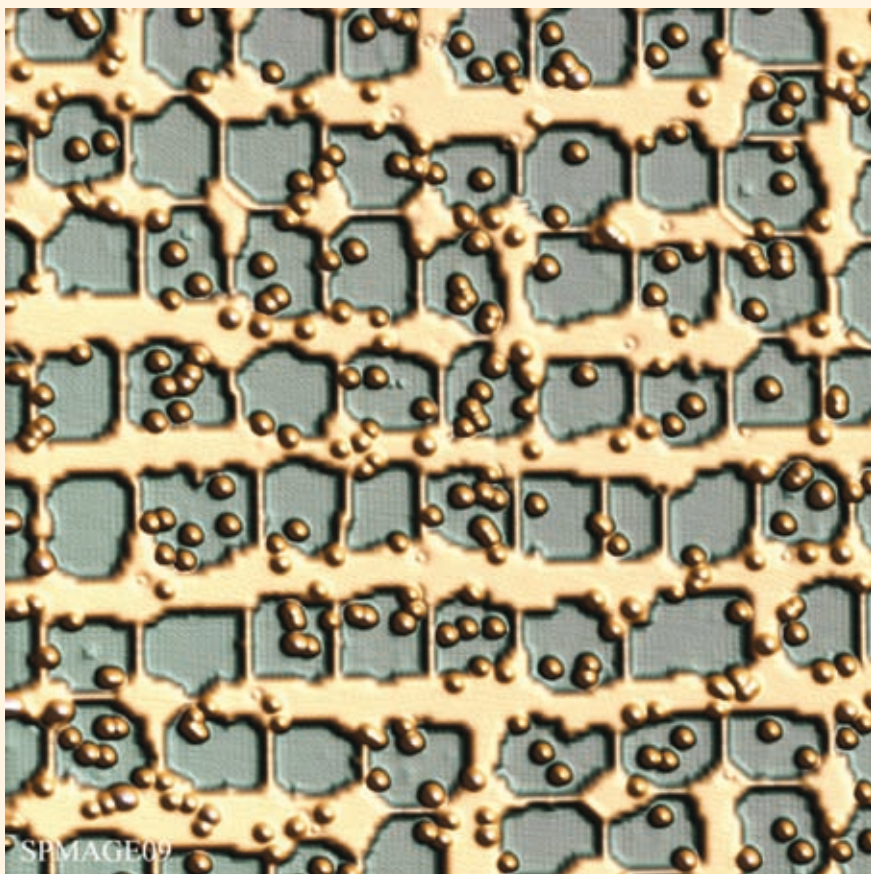
EN ESTA OCASIÓN, PRESENTAMOS LOS TRES PRIMEROS LUGARES DEL CONCURSO "INTERNATIONAL SCANNING PROBE MICROSCOPY IMAGE PRIZE, EDICIÓN 2009".

VÉASE: WWW.ICMM.CSIC.ES/SPMAGE.

▼ 2do Lugar

Átomos dispersos en patrón de parches

Autor: Sander Otte, NIST-Center for Nanoscale Science and Technology (Estados Unidos)

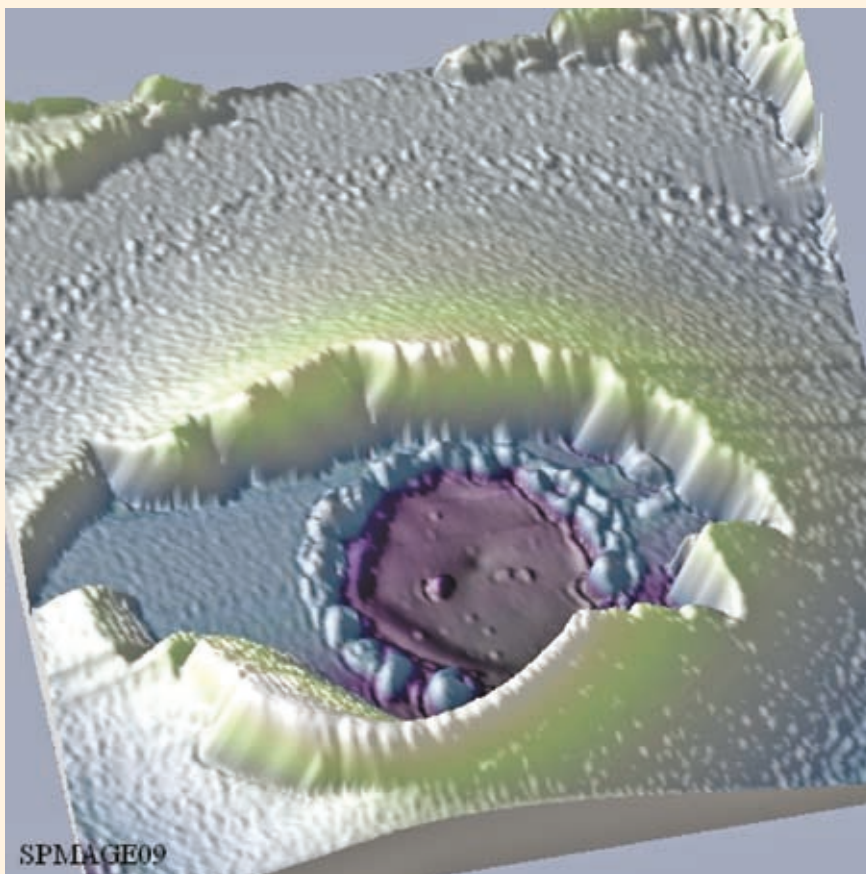


ÁTOMOS INDIVIDUALES DE HIERRO, COBALTO Y MANGANESO EVAPORADOS EN PARCHES DE UN ÁTOMO DE GROSOR DE NITRURO DE COBRE. LOS PARCHES DE AISLANTE DE NITRURO DE COBRE APARECEN COMO LIGERAS DEPRESIONES CON RESPECTO A LOS ALREDEDORES DE COBRE DESNUDO. EN MODELO TOPOGRÁFICO, LOS TRES TIPOS DE ÁTOMOS MAGNÉTICOS PARECEN IDÉNTICOS, PERO CADA UNO SE PUEDE IDENTIFICAR FÁCILMENTE POR LOS PATRONES ÚNICOS DE EXCITACIÓN DE *SPIN*.

▼ 3er Lugar

Nanopesca en temporada invernal

Autor: Sviatlana Abetkovskaia, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute (Belarús)



UNA CAVERNA MULTICAPA, RESULTANTE DE LA DESTRUCCIÓN POR INCINERACIÓN DEL RECUBRIMIENTO, ES DETECTADA EN LA SUPERFICIE DE UN LENTE DESPUÉS DE SU USO EN UN RESONADOR LÁSER. EL OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN FUE CONTROLAR LA CALIDAD EN LOS DETALLES MODERNOS DE LA ÓPTICA. LA IMAGEN FUE ADQUIRIDA CON UN MICROSCOPIO MULTIFUNCIONAL DE SONDA DE BARRIDO NT-206.

INSTRUCTIVO PARA AUTORES

MUNDO NANO. REVISTA INTERDISCIPLINARIA EN NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA INVITA A ENVIAR COLABORACIONES PARA SUS DOS SIGUIENTES NÚMEROS; LA FECHA LÍMITE DE ENTREGA PARA EL QUE SALDRÁ EL PRIMER SEMESTRE DEL 2010 (ENERO-JUNIO) SERÁ LA PRIMERA SEMANA DE DICIEMBRE DE 2009 Y, PARA EL QUE SE PUBLICARÁ EL SEGUNDO SEMESTRE (JULIO-DICIEMBRE), LA PRIMERA SEMANA DE JUNIO.

LAS COLABORACIONES DEBEN AJUSTARSE AL OBJETIVO PRINCIPAL DE LA REVISTA, ESTO ES, DISEMINAR LOS AVANCES Y RESULTADOS DEL QUEHACER CIENTÍFICO Y HUMANÍSTICO EN LAS ÁREAS DE LA NANOCIENCIA Y LA NANOTECNOLOGÍA POR MEDIO DE ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN ESCRITOS EN ESPAÑOL. ESTA PUBLICACIÓN ESTÁ DIRIGIDA A UN PÚBLICO INTERESADO EN AUMENTAR SUS CONOCIMIENTOS SOBRE LA NANOCIENCIA Y LA NANOTECNOLOGÍA. DESEAMOS INCLUIR ENTRE NUESTROS LECTORES TANTO A PROFESIONISTAS COMO A ESTUDIANTES. LA REVISTA ESTÁ ORGANIZADA EN LAS SIGUIENTES SECCIONES:

CARTAS DE LOS LECTORES

CARTAS DE LOS LECTORES CON SUGERENCIAS, COMENTARIOS O CRÍTICAS. COMENTARIOS SOBRE ARTÍCULOS APARECIDOS EN NÚMEROS ANTERIORES DE LA REVISTA.

NOTICIAS

NOTAS BREVES QUE EXPLIQUEN DESCUBRIMIENTOS CIENTÍFICOS, ACTOS ACADÉMICOS, RECONOCIMIENTOS IMPORTANTES OTORGADOS.

ARTÍCULOS

ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN SOBRE ASPECTOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS, POLÍTICO-ECONÓMICOS, ÉTICOS, SOCIALES Y AMBIENTALES DE LAS NANOCIENCIAS Y LA NANOTECNOLOGÍA. DEBEN PLANTEAR ASPECTOS ACTUALES DEL TEMA ESCOGIDO Y DAR TODA LA INFORMACIÓN NECESARIA PARA QUE UN LECTOR NO ESPECIALISTA EN EL TEMA LO PUEDA ENTENDER. SE DEBERÁ HACER HINCAPIÉ EN LAS CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES Y MANTENER UNA ALTA CALIDAD DE CONTENIDO Y ANÁLISIS.

RESEÑAS DE LIBROS

RESEÑAS SOBRE LIBROS PUBLICADOS RECIENTEMENTE EN EL ÁREA DE NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA.

IMÁGENES

SE PUBLICARÁN LAS MEJORES FOTOS O ILUSTRACIONES EN NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA, LAS CUALES SERÁN ESCOGIDAS POR EL COMITÉ EDITORIAL.

MECANISMO EDITORIAL

▼ **I** TODA CONTRIBUCIÓN SERÁ EVALUADA POR EXPERTOS EN LA MATERIA. LOS CRITERIOS QUE SE APLICARÁN PARA DECIDIR SOBRE LA PUBLICACIÓN DEL MANUSCRITO SERÁN LA CALIDAD CIENTÍFICA DEL TRABAJO, LA PRECISIÓN DE LA INFORMACIÓN, EL INTERÉS GENERAL DEL TEMA Y EL LENGUAJE CLARO Y COMPRENSIBLE UTILIZADO EN LA REDACCIÓN. LOS TRABAJOS ACEPTADOS SERÁN REVISADOS POR UN EDITOR DE ESTILO. LA VERSIÓN FINAL DEL ARTÍCULO DEBERÁ SER APROBADA POR EL AUTOR, SÓLO EN CASO DE HABER CAMBIOS SUSTANCIALES.

LOS ARTÍCULOS DEBERÁN SER ENVIADOS POR CORREO ELECTRÓNICO A AMBOS EDITORES CON COPIA AL EDITOR ASOCIADO DE LA REVISTA MÁS AFÍN AL TEMA DEL ARTÍCULO Y CON COPIA A MUNDON@CNYN.UNAM.MX.

▼ **II** LOS MANUSCRITOS CUMPLIRÁN CON LOS SIGUIENTES LINEAMIENTOS:

- A) ESTAR ESCRITOS EN MICROSOFT WORD, EN PÁGINA TAMAÑO CARTA, Y TIPOGRAFÍA TIMES NEW ROMAN EN 12 PUNTOS, A ESPACIO Y MEDIO. TAMAÑO MÁXIMO DE LAS CONTRIBUCIONES: NOTICIAS, UNA PÁGINA; CARTAS DE LOS LECTORES, DOS PÁGINAS; RESEÑAS DE LIBROS, TRES PÁGINAS; ARTÍCULOS COMPLETOS, QUINCE PÁGINAS.
- B) EN LA PRIMERA PÁGINA DEBERÁ APARECER EL TÍTULO DEL ARTÍCULO, EL CUAL DEBERÁ SER CORTO Y ATRACTIVO; EL NOMBRE DEL AUTOR O AUTORES; EL DE SUS INSTITUCIONES DE ADSCRIPCIÓN CON LAS DIRECCIONES POSTALES Y ELECTRÓNICAS, ASÍ COMO LOS NÚMEROS TELEFÓNICOS Y DE FAX.
- C) ENVIAR UN BREVE ANEXO QUE CONTENGA: RESUMEN DEL ARTÍCULO, IMPORTANCIA DE SU DIVULGACIÓN Y UN RESUMEN CURRICULAR DE CADA AUTOR QUE INCLUYA: NOMBRE, GRADO ACADÉMICO Y/O EXPERIENCIA PROFESIONAL, NÚMERO DE PUBLICACIONES, DISTINCIONES Y PROYECTOS MÁS RELEVANTES.
- D) LAS REFERENCIAS, DESTINADAS A AMPLIAR LA INFORMACIÓN QUE SE PROPORCIONA AL LECTOR DEBERÁN SER CITADAS EN EL TEXTO. LAS FICHAS BIBLIOGRÁFICAS CORRESPONDIENTES SERÁN AGRUPADAS AL FINAL DEL ARTÍCULO, EN ORDEN ALFABÉTICO. EJEMPLOS:
 1. ARTÍCULOS EN REVISTAS (NO SE ABREVIEN LOS TÍTULOS NI DE LOS ARTÍCULOS NI DE LAS REVISTAS):
N. TAKEUCHI, N. (1998). "CÁLCULOS DE PRIMEROS PRINCIPIOS: UN MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL ESTUDIO DE MATERIALES". *Ciencia y Desarrollo*, vol. 26, núm. 142, 18.
 2. LIBROS:
DELGADO, G.C. (2008). *GUERRA POR LO INVISIBLE: NEGOCIO, IMPLICACIONES Y RIESGOS DE LA NANOTECNOLOGÍA*. CEIICH, UNAM. MÉXICO.
 3. INTERNET.
NOBELPRIZE.ORG. (2007). THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 1986.
EN: WWW.NOBELPRIZE.ORG/NOBEL_PRIZES/PHYSICS/LAUREATES/1986/PRESS.HTML.
 4. EN EL CUERPO DEL TEXTO, LAS REFERENCIAS DEBERÁN IR COMO EN EL SIGUIENTE EJEMPLO:
"...Y A LOS LENGUAJES COMUNES PROPUESTOS (AMOZURRUTIA, 2008a) COMO LA EPISTEMOLOGÍA."
SI SON VARIOS AUTORES, LA REFERENCIA EN EL CUERPO DEL TEXTO IRÁ:
(GARCÍA-SÁNCHEZ ET AL., 2005; SMITH, 2000).
 5. LAS NOTAS SERÁN SÓLO EXPLICATIVAS, O PARA AMPLIAR CIERTA INFORMACIÓN.
- E) SE RECOMIENDA LA INCLUSIÓN DE GRÁFICAS Y FIGURAS. ÉSTAS DEBERÁN SER ENVIADAS POR CORREO ELECTRÓNICO, EN UN ARCHIVO SEPARADO AL DEL TEXTO, EN FORMATOS TIF O JPG, CON UN MÍNIMO DE RESOLUCIÓN DE 300 PÍXELES POR PULGADA, Y ESTAR ACOMPAÑADAS POR SU RESPECTIVA FUENTE.

EVENTOS

▼ 16 a 19 de mayo 2010

7th Nanotech – 5th SAMN 2010



CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA LEON, GTO.
MEX.

WWW.CIO.MX/NANOTECH

▼ 27 a 29 de mayo 2010

Nanotech China



SHANGHAI EVERBRIGHT CONVENTION & EXHIBITION
CENTER SHANGAI, CHINA

WWW.NANOTECHCHINA.ORG

▼ 7 a 11 de junio de 2010

First International Nanotechnology Congress



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL QUITO, ECUADOR
[HTTP://NANO2010.EPN.EDU.EC](http://NANO2010.EPN.EDU.EC)

▼ 21 a 25 de junio de 2010

Nanotech Conference & Expo 2010



NANO SCIENCE AND TECHNOLOGY INSTITUTE
(NSTI) ANAHEIM CONVENTION CENTER, ANAHEIM,
CALIFORNIA

WWW.TECHCONNECTWORLD.COM/NANOTECH2010/

▼ 4 a 6 de agosto de 2010

**International Conference on nanotechnology:
Fundamentals and Applications**



INTERNATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING
AND TECHNOLOGY. SEDE: UNIVERSITY OF OTTAWA.
[HTTP://INTERNATIONAL-ASET.COM/2010_
NANOTECHNOLOGY_CONFERENCE](http://international-aset.com/2010_NANOTECHNOLOGY_CONFERENCE)

▼ 24 a 27 de agosto de 2010

Third International NanoBioConference



ETH ZURICH, SUIZA
WWW.NANOBIO.ETHZ.CH

▼ 29 de agosto al 2 de septiembre de 2010

Commercialization of Micro-Nano Systems Conference



HYATT REGENCY TAMAYA RESORT & SPA ALBUQUERQUE,
NUEVO MÉXICO. EUA
WWW.MANCEF.ORG/COMS

▼ 1 a 3 de noviembre de 2010

Rusnanotech



EXPOCENTRE, MOSCÚ. RUSIA
[HTTP://RUSNANOFORUM.RU](http://RUSNANOFORUM.RU)

▼ 16 a 18 de noviembre de 2010

Nano Safe 2010



MAISON MINATEC GRENOBLE, FRANCIA
WWW.NANOSAFE.ORG/SCRIPTS/HOME/PUBLIGEN/CONTENT/TEMPLATES/SHOW.ASP?P=100&L=EN



La Universidad Nacional Autónoma de México
a través del Consorcio Académico nanoUNAM
invita a



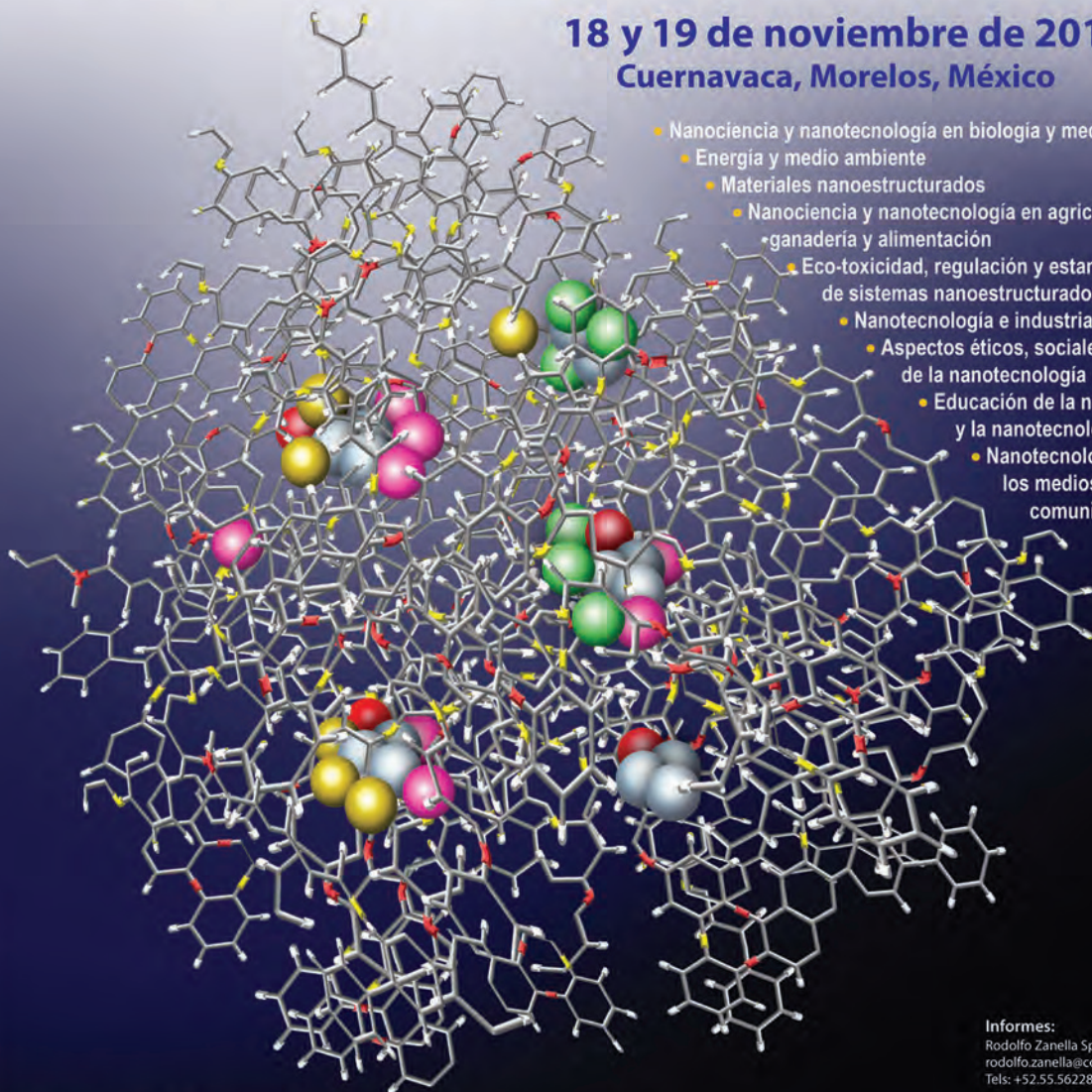
nanomex'10

Encuentro Internacional e Interdisciplinario en Nanociencia y Nanotecnología

Gian Carlo Delgado Ramos, Noboru Takeuchi, América Vázquez Olmos, Rodolfo Zanella Specia y Hailin Zhao Hu (coordinadores)

18 y 19 de noviembre de 2010
Cuernavaca, Morelos, México

- Nanociencia y nanotecnología en biología y medicina
- Energía y medio ambiente
- Materiales nanoestructurados
- Nanociencia y nanotecnología en agricultura, ganadería y alimentación
- Eco-toxicidad, regulación y estandarización de sistemas nanoestructurados
- Nanotecnología e industria
- Aspectos éticos, sociales y legales de la nanotecnología
- Educación de la nanociencia y la nanotecnología
- Nanotecnología y los medios de comunicación



10 de mayo - apertura de registro en línea
15 de agosto - cierre de aceptación de propuestas
20 de septiembre - inicio de aviso de propuestas aceptadas
hasta el 15 de octubre - inscripciones con costo reducido

<http://www.ceich.unam.mx/nanomex2010>

Sede:

Hotel Racquet, Av. Francisco Villa 100
Fraccionamiento Rancho Cortés 62120
Cuernavaca, Morelos
Tel. (777) 1010350

Informes:

Rodolfo Zanella Specia
rodolfo.zanella@ccadet.unam.mx
Tels: +52.55.56228602 Ext 1261

América Vázquez Olmos
america.vazquez@ccadet.unam.mx
Tels: +52.55.56228602 Ext 1264

Dr. Gian Carlo Delgado
giandelgado@unam.mx
Tels: +52.55.56230222 Ext 42777

