

Nanoquímica: una verdadera revolución científico-tecnológica

M. ARTURO LÓPEZ-QUINTELA*

RESUMEN**

La nanoquímica –dedicada al estudio de la síntesis y las propiedades de materiales de tamaños submicrométricos (nanomateriales)– ha cobrado en los últimos años gran influencia como agente económico capaz de iniciar una nueva revolución científico-tecnológica. En este artículo se muestran, de forma sencilla y general, las bases científicas por las que la nanoquímica ha iniciado esta nueva revolución, describiéndose los campos de aplicación más importantes en los que tendrá un mayor y más rápido impacto. Asimismo, se analizan los posibles cambios económico-empresariales asociados a la implantación de esta nueva tecnología.

1. INTRODUCCIÓN

La nanoquímica representa una parte de la química dedicada al estudio de la síntesis y las propiedades de materiales de tamaños submicrométricos, denominados nanomateriales. En principio, las propiedades de los nanomateriales deberían ser diferentes de las de los materiales masivos, ya que su superficie relativa aumenta con la disminución del tamaño. Muchas de las aplicaciones de los materiales están relacionadas con la superficie de los mismos. Así, por ejemplo, los catalizadores aumentan su eficiencia proporcionalmente a su

* Universidad de Santiago de Compostela (malopez.quintela@usc.es).

** El autor agradece a todas las personas que han trabajado o colaborado con el Grupo de Investigación en Nanotecnología y Magnetismo (Nanomag) de la USC (Instituto de Investigaciones Tecnológicas) desde sus comienzos, así como a las que han contribuido a desarrollar la compañía Nanogap.

superficie activa, constituida únicamente por los átomos de la superficie. Por esta razón, los nanomateriales son catalizadores más eficientes que los catalizadores tradicionales. Existen, además, otras propiedades que, por la misma razón, dependen también del tamaño del material, como, por ejemplo, las propiedades ópticas, magnéticas, etcétera. Este hecho, relacionado con el previsible cambio de las propiedades de los materiales al reducir su tamaño, podría llegar a suponer una verdadera revolución tecnológica, pero –evidentemente– no científica. Sin embargo, se ha observado que cuando los nanomateriales se reducen a tamaños muy pequeños, de forma que contengan solamente un número reducido de átomos (menor de aproximadamente 100-500 átomos), las propiedades cambian drásticamente y de forma no previsible si se tiene en cuenta solamente su mayor relación superficie/volumen. En esta última región de la materia, antes de llegar a los átomos, los efectos cuánticos de tamaño juegan un papel muy importante, de forma que aparecen nuevas e inesperadas propiedades que convierten a los nanomateriales en –también– una nueva revolución científica.

Por su carácter transversal, la nanoquímica puede estar presente en la mayor parte de los sectores productivos, por lo que su potencial influencia como nuevo agente económico capaz de iniciar una nueva revolución científico-tecnológica es un hecho ya reconocido. En este artículo se mostrarán, de forma sencilla y general, las bases científicas por las que la nanoquímica ha iniciado esta nueva revolución, describiéndose los campos de aplicación más importantes en los que la nanoquímica tendrá una mayor y más rápida influencia, y se hará un análisis de los posi-

bles cambios económicos-empresariales asociados a la implantación de esta nueva tecnología.

2. BASES CIENTÍFICAS DE LA NANOQUÍMICA

“There is plenty of room at the bottom”. Este es el título de la conferencia invitada que Richard Feynman (premio Nobel de Física en 1965) impartió en el encuentro anual de la *American Physical Society*, el 29 de diciembre de 1959. En este discurso, Feynman expuso la importancia y necesidad del estudio de la materia a nivel “nanoscópico”. Sin embargo, en la época de Feynman, existían verdaderas limitaciones para el estudio y la caracterización de nanoestructuras. Tuvo que esperarse a la década de los ochenta, cuando el alemán Gerd Binnig y el suizo Heinrich Röhrer revolucionaron el mundo de la microscopía con la invención del microscopio de efecto túnel (STM), que les llevó hacia el Nobel en 1986. Tan solo un par de años después, el mismo Binnig, esta vez con otros dos colaboradores, el suizo Christoph Gerber y el americano

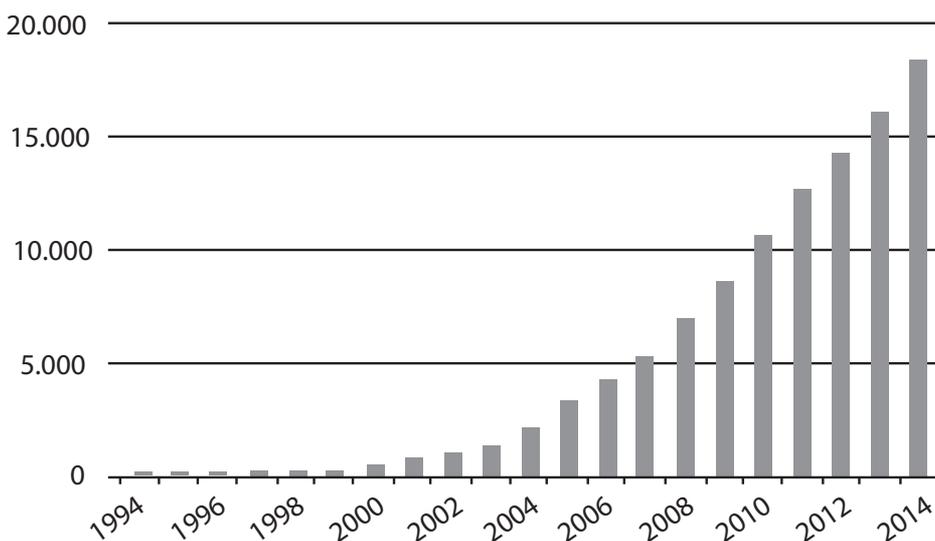
Calvin Quate, dio un paso más con el desarrollo del microscopio de fuerzas atómicas (AFM), que permitía la misma resolución atómica en condiciones atmosféricas sin la restricción de que la punta y la superficie fueran conductoras.

Desde entonces, la nanotecnología ha crecido de forma exponencial hasta nuestros días, tal como puede verse reflejado en el número de publicaciones y la inversión anual en investigación en este campo (gráficos 1 y 2). El gráfico 1 muestra el número de publicaciones en las que se cita el nombre nanopartícula (NP), entendida como materiales formados por partículas menores de aprox. 100 nanómetros de tamaño. El gráfico 2 representa el crecimiento en la inversión pública en diferentes países desde el año 2000.

Una pregunta surge entonces, ¿por qué el gran auge de esta nueva disciplina? En primer lugar, podemos atribuirlo a que esta tecnología tiene un carácter fundamentalmente transversal, ya que se define de acuerdo a la escala (nanoescala) y no al sistema en concreto de estudio, de forma que sus aplicaciones abarcan (o pueden abarcar) a prácticamente todos los ámbitos del quehacer humano incluyendo el medio ambiente,

GRÁFICO 1

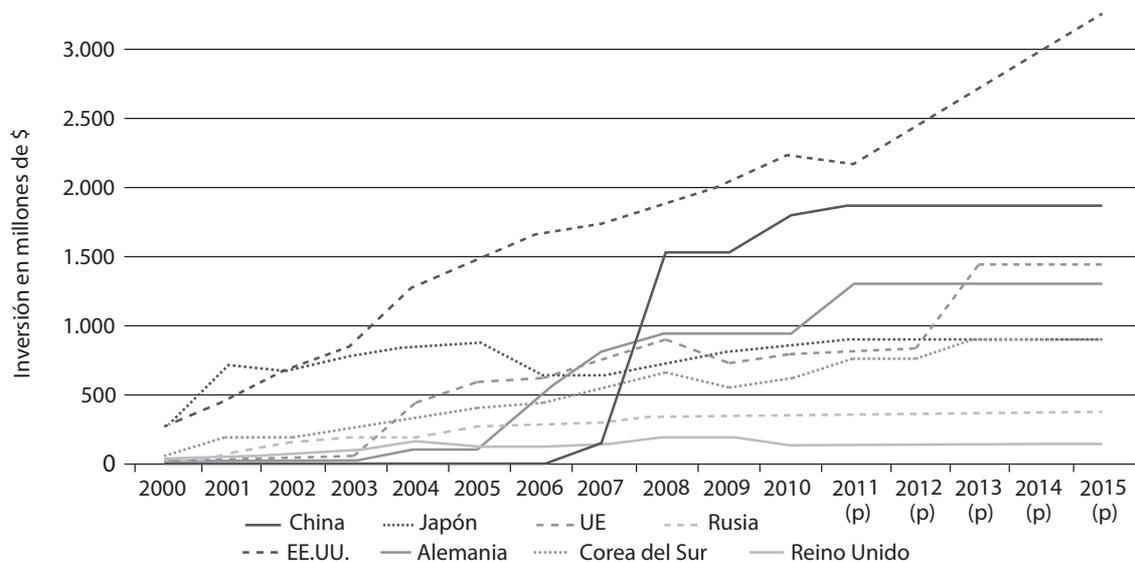
CRECIMIENTO DEL NÚMERO DE PUBLICACIONES EN NANOTECNOLOGÍA DESDE 1994



Fuente: Griffiths (2014).

GRÁFICO 2

INVERSIÓN PÚBLICA EN NANOTECNOLOGÍA DESDE EL AÑO 2000



Fuente: Cientifica Ltd, *Global Funding in Nanotechnologies & Its Impact* (julio, 2011).

la energía, la medicina, las industrias de alimentos, textiles, la construcción, los transportes, la electrónica, las tecnologías de la información y comunicaciones, la agricultura, la ganadería, la cosmética, etcétera. Podemos así afirmar que la nanotecnología dará origen a la revolución industrial del siglo XXI, como ya lo dijo Charles M. Vest (exrector del Massachusetts Institute of Technology) en un discurso pronunciado en Londres el año 2001¹. En la figura 1 se pueden observar las innumerables aplicaciones de la nanotecnología y su relación con las áreas clásicas tradicionales.

En segundo lugar, la importancia de los nanomateriales viene motivada por el hecho de que sus propiedades se encuentran "a mitad de camino" entre las de los átomos –dominados por los efectos cuánticos– y los materiales macroscópicos. Dentro de este apartado es conveniente recordar que los efectos cuánticos, debido al pequeño tamaño de las nanopartículas –sobre todo, en los tamaños inferiores ($\approx < 10\text{nm}$), conocidos como efectos cuánticos de tamaño– son un exponente de las nuevas propiedades que aparecen en esta zona de la materia.

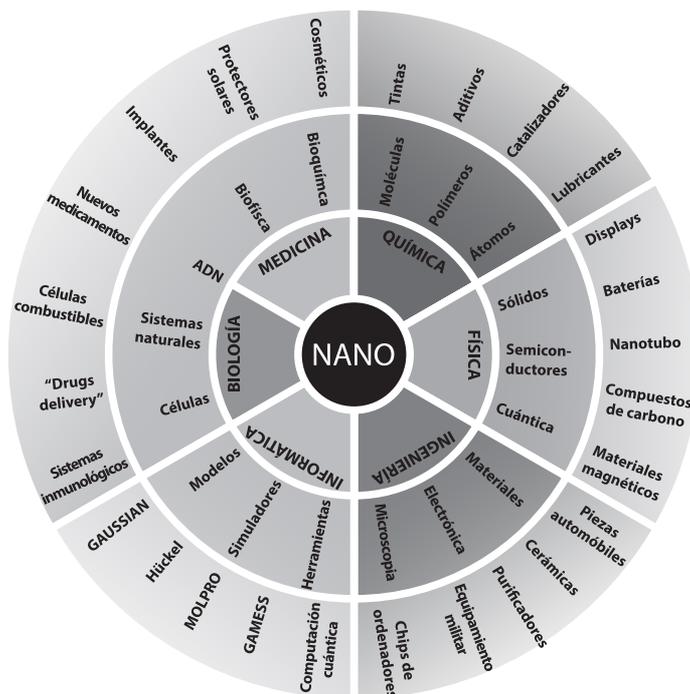
¹ Bajo el título "Education for a New Era" (<http://web.mit.edu/president/communications/guildhall.html>).

Un claro ejemplo de la gran influencia que ejercen los efectos cuánticos podemos verlo en los metales. Cuando el metal se divide en pequeños fragmentos de tamaños nanométricos, desaparece su característico brillo metálico y da lugar a la aparición de vistosos colores que dependen del tipo de metal (fundamentalmente en la plata, el oro y el cobre). Este hecho se debe a que los electrones libres de conducción, presentes en la superficie de las partículas metálicas, pueden oscilar con la luz absorbiendo energía. Estos vistosos colores de las nanopartículas fueron ya empleados, aunque sin saber su fundamento, por los expertos en el arte de las vidrieras en los siglos XI y XII. Los componentes principales generalmente utilizados durante este periodo para la fabricación del vidrio eran, según la descripción del monje benedictino alemán Theophilus (*De diversis artibus*): una parte de arena y dos partes de cenizas de madera de haya, adicionando a la masa vítrea determinados óxidos para lograr los vidrios de color.

Sin embargo, cuando el tamaño de la nanopartícula metálica se reduce todavía más y comienza a ser similar al de la longitud de onda λ de De Broglie ($\approx 0.5\text{ nm}$), las partículas comienzan a comportarse electrónicamente como puntos

FIGURA 1

EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA MOSTRANDO SU CARÁCTER TRANSVERSAL



Fuente: Nanopuc (<http://www.ica.ele.puc-rio.br/nanonapucio/mod/resource/view.php?id=3>).

de dimensión cuántica cero (o cajas cuánticas). Al igual que sucede en los átomos, los electrones que antes se movían libres en las nanopartículas, son ahora atrapados en la caja y dejan de ser electrones libres, por lo que las partículas pierden su carácter metálico y desaparece su correspondiente color. Esto es lo que ocurre cuando entramos en la región denominada de los clústeres atómicos, que no son más que agrupaciones de átomos ($\approx 100-200$ átomos), con tamaños inferiores a $\approx 1,5$ nm, comportándose de modo muy diferente a los átomos del metal. Ahora, el *metal* con estas dimensiones solamente algo mayores que los átomos, *paradójicamente* deja de ser *metálico* y su comportamiento se asemeja más a los semiconductores o moléculas formadas por agrupaciones de átomos (Calvo, Rivas y López-Quintela, 2012).

Este ejemplo pone de manifiesto una particularidad muy importante de los materiales, que había pasado inadvertida: las propiedades de los materiales dependen de su tamaño y pueden

ser completamente diferentes a las del material masivo.

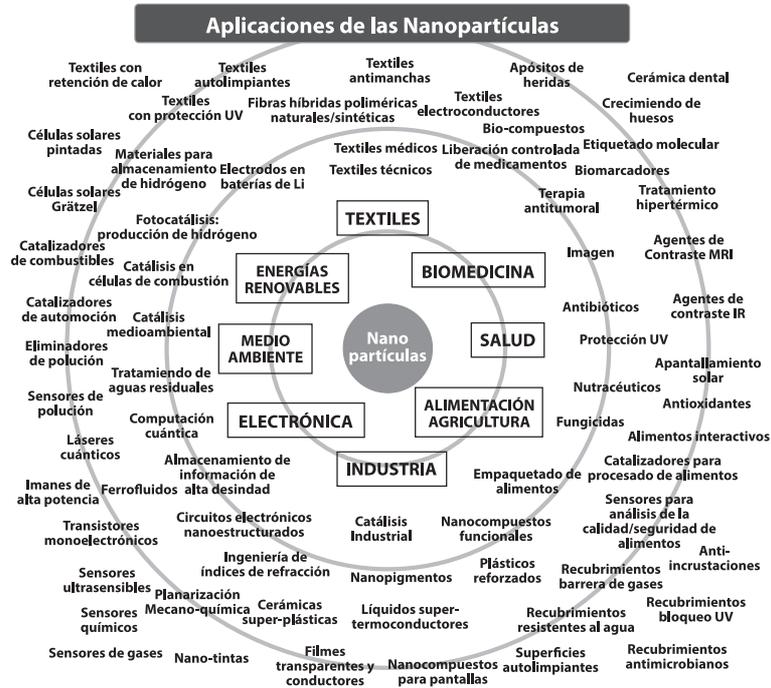
3. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA NANOQUÍMICA

La nanoquímica y, en particular, los nanomateriales ya se están usando en numerosos productos y en una gran diversidad de aplicaciones industriales. La figura 2 representa una visión de la impresionante variedad de las aplicaciones de las nanopartículas.

Sería muy difícil y, al mismo tiempo, fuera de los límites del presente artículo, una descripción de todas las posibles aplicaciones de los nanomateriales. Por ello, en esta sección, mostraremos solamente algunas de las aplicaciones

FIGURA 2

APLICACIONES DE LOS NANOMATERIALES



Fuente: Tsuzuki (2009).

que a nuestro entender son (o pueden ser) más relevantes (una lista exhaustiva de los productos nanotecnológicos que se comercializan en la actualidad, así como sus aplicaciones en los diferentes campos, se puede consultar en la página web de Nanowerk [www.nanowerk.com]).

3.1. Electrónica

Dentro de este capítulo merece una mención especial el desarrollo de materiales conductores y transparentes para la nueva generación de pantallas táctiles (*transparent conductive films*, TCFs). Los principales motores comerciales para la sustitución del material actualmente empleado (cerámica de óxido de estaño dopado con indio, más conocido por su acrónimo inglés, ITO, *indium tin oxide*) son: una mejora de sus pro-

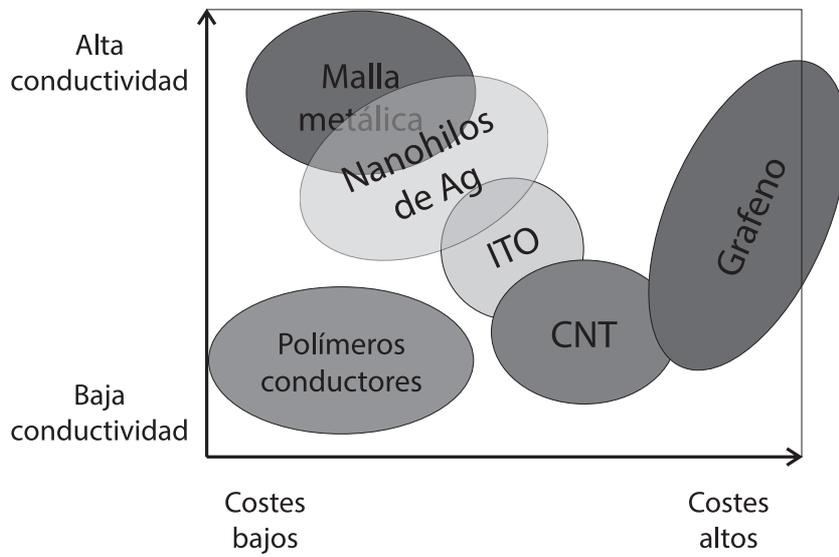
piedades optoeléctricas (disminución de su resistencia eléctrica y aumento de la transparencia), lo que viene motivado por la necesidad de aumentar el tamaño de las pantallas táctiles, mejorar la calidad de la respuesta al tacto, disminuir el consumo de energía, el peso y el grosor de los dispositivos móviles, así como lograr dispositivos flexibles (por ejemplo, teléfonos móviles curvos y pantallas táctiles), algo que no puede hacerse evidentemente con la cerámica de ITO.

Aunque en el mercado existen diferentes alternativas al ITO, tal como se muestra en la figura 3, parece que las nanofibras de plata tienen una gran ventaja respecto a sus competidores por su bajo coste y alta conductividad eléctrica.

Para que las nanofibras de Ag tengan las propiedades electroópticas adecuadas para sustituir y mejorar las propiedades del ITO, es necesario que su diámetro sea inferior a $\approx 30\text{-}50\text{nm}$, al objeto de evitar la difracción de la luz visible

FIGURA 3

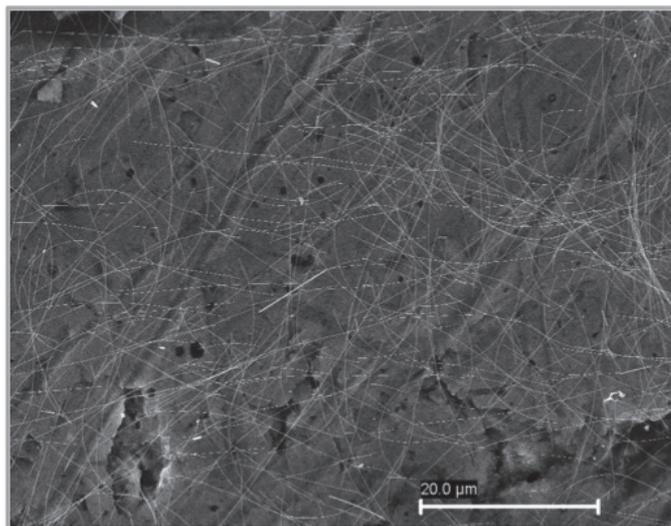
PRESTACIONES (CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA VS. PRECIO) DE DIFERENTES NANOMATERIALES



Fuente: De Graaf et al. (2015).

FIGURA 4

FOTOGRAFÍA DE NANOFIBRAS DE PLATA (< 30NM DE DIÁMETRO Y ≈ 20 μm DE LONGITUD)



Fuente: Nanogap (www.nanogap.es).

(diámetro aprox. inferior a 1/10 la longitud onda de la luz, que está en el intervalo 390-800nm) y aumentar de esa forma su transparencia. Al mismo tiempo, la longitud de las nanofibras ha de ser mayor de $\approx 10\text{-}20\ \mu\text{m}$ para garantizar una buena conexión eléctrica entre las fibras manteniendo una concentración baja de las mismas (para aumentar al máximo la transparencia) en el TCF final. La figura 4 muestra una imagen de nanofibras de plata.

3.2. Medicina

Aunque son muchas –y de gran importancia– las aplicaciones de la nanotecnología a la medicina, nos centraremos solamente en dos de las que consideramos más relevantes.

La primera aplicación está relacionada con la utilización de nanopartículas para hipertermia magnética (MH). Las partículas magnéticas poseen la propiedad de poder ser alteradas remotamente mediante la aplicación de un campo magnético externo. Dependiendo de la aplicación, el campo magnético puede producir diferentes efectos, tales como la separación magnética de células (empleada ya actualmente en numerosos equipos clínicos comerciales), la liberación controlada de medicamentos, MH, etcétera. Una de las técnicas más desarrolladas basadas en la utilización de nanopartículas magnéticas (MNP) es la hipertermia magnética, en la que se induce la generación de calor exponiendo el sistema que contiene las MNP a un campo magnético alterno al objeto de destruir células tumorales, lo que se consigue aumentando la temperatura por encima de 45°C o provocando un calentamiento más suave (entre 40°C y 45°C) con el fin de disminuir la resistencia de dichas células. Para ello, se han desarrollado nanopartículas magnéticas con estructuras cor-corona conteniendo un conjunto predefinido de funcionalidades jerárquicas, de forma que permitan combinar la hipertermia con otras posibles aplicaciones, tales como permitir la observación del propio tejido en el que se encuentran dispersas las MNP mediante imágenes de resonancia magnética (MRI) inducida por el campo magnético creado por las MNP, liberación controlada de medicamentos, o la propia regeneración del tejido que se puede activar por la aplicación del campo magnético.

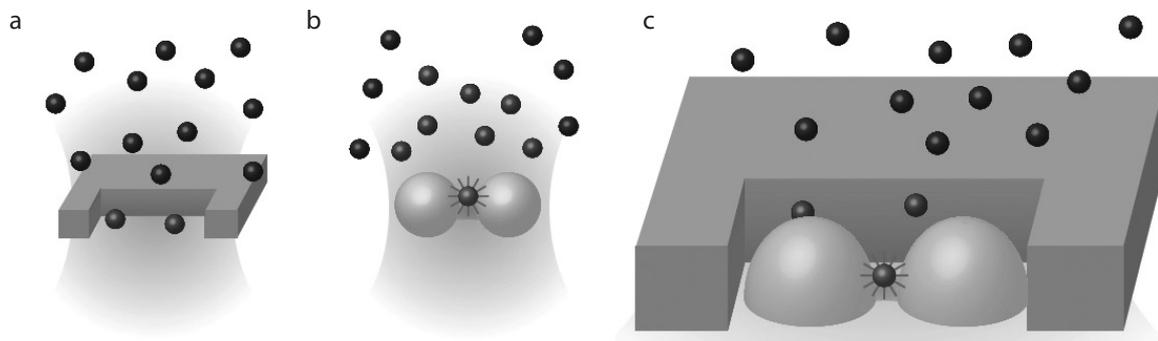
Basados en este tipo de MNP, se han hecho estudios de destrucción de células tumorales mediante la aplicación de calentamientos muy localizados por MH, lo que implica un riesgo mínimo para las células sanas cercanas al tumor. Es de destacar en este sentido que la empresa MagForce AG (Berlín, Alemania) ha desarrollado una terapia clínica totalmente operativa basada en nanopartículas de magnetita recubiertas con amilosa. Junto con el nanoactivador, que produce campos magnéticos a una frecuencia de 100kHz , es capaz de tratar, en principio, tumores de aproximadamente $5\ \text{cm}$, inyectando 3mL del ferrofluido que contiene las MNP al paciente. Actualmente se encuentra en ensayos clínicos en fase II y ha obtenido el permiso europeo para el tratamiento de tumores cerebrales tras demostrar su eficacia al aumentar la esperanza de vida entre seis y trece meses (comparado con el tratamiento combinado de quimio y radioterapia) en pacientes con tumores cerebrales de glioblastoma multiforme.

Al mismo tiempo, recientemente han aparecido ejemplos de la hipertermia combinada con otras aplicaciones siguiendo el esquema de las nanopartículas multi-aplicación representadas en la figura 4. Así, Glat *et al.* (2013) han demostrado el efecto beneficioso del péptido de fibrina enlazado a MNP de óxidos de hierro para reducir la activación de células microgliales en ratones con la mutación rTg4510, que presentan un daño de fibrilación neuronal (relacionado con enfermedades degenerativas tales como Alzheimer, Pick y Parkinson). El tratamiento con las MNP hace disminuir el número de neuronas afectadas por la presencia de ovillos neurofibrilares, con lo que abre grandes expectativas para el tratamiento de estas enfermedades.

La segunda de las aplicaciones está relacionada con lo que se conoce como detección de moléculas individuales (*single-molecule detection*). La detección de una única molécula es el objetivo soñado en análisis químico y adquiere extraordinario interés en el campo de las biociencias, en general, y en el de la secuenciación de ADN, en particular. En general, las técnicas utilizadas se basan en espectroscopía Raman amplificada por superficies (*surface enhanced Raman spectroscopy*, SERS), espectroscopía de correlación de fluorescencia confocal (*confocal fluorescence correlation spectroscopy*, CFS). Para detectar una única molécula, el volumen de observación ha de contener únicamente una única molécula objeto de obser-

FIGURA 5

APROXIMACIONES NANOFOTÓNICAS PARA LA DETECCIÓN INDIVIDUAL DE MOLÉCULAS



Nota: A) Detección en nanoaperturas reduce el volumen de observación de forma que se pueden detectar moléculas individuales (esferas) incluso a concentraciones micromolares. B) Dos nanoesferas forman un espacio-nanoantena con un "punto caliente" en medio. La fluorescencia de moléculas en ese punto se ve amplificada varios órdenes de magnitud. C) El concepto de nano-antena en una caja combina sinérgicamente ambas aproximaciones.

Fuente: Tinnefeld (2013).

vacación. La máxima concentración que se puede detectar por medios ópticos está restringida por el tamaño del volumen de observación, que, a su vez, viene limitada por el límite de difracción de la luz. Esto implica que es imposible realizar una detección de moléculas individuales a concentraciones superiores a subnano-pico molar, ya que el volumen de observación contendría más de una molécula. Por su parte, a concentraciones mucho más pequeñas que pico-molar la detección individual de moléculas llevaría mucho tiempo y sería impracticable.

Esta barrera de concentraciones inferiores a nanomolar ha impedido el uso de estas técnicas para el estudio de interacciones biomoleculares, tales como interacciones proteína-proteína y enzima-sustrato (cuyas constantes de disociación se encuentran en el intervalo micromolar), pues los reactivos han de estar presentes en concentraciones suficientemente altas para obtener una fracción significativa del complejo bimolecular. Por este motivo, se han diseñado diferentes estrategias con el objeto de superar el límite de difracción. Una forma de hacerlo es controlando la naturaleza ondulatoria de la luz mediante, por ejemplo, ópticas de campo cercano (*near-field optics*), como se hace en la microscopía óptica de

barrido de campo cercano (*near-field scanning optical microscopy*, NFSOM). Para ello se han utilizado fundamentalmente dos estrategias basadas en nanoestructuras fotónicas, tal como puede verse en la figura 5.

En la primera (figura 5a), la luz se confina al campo cercano utilizando nanoaperturas (en un film de aluminio u oro sobre un sustrato de sílica) con dimensiones inferiores a la longitud de onda de la luz. Sin embargo, esta técnica presenta un límite al disminuir el tamaño de la nanoapertura, pues se reduce también drásticamente la señal de fluorescencia, debido a la gran disminución de la intensidad de excitación. Además, el film metálico origina normalmente una desactivación (*quenching*) de la fluorescencia. Una aproximación alternativa (figura 5b) es aumentar localmente el campo de excitación usando una nanoantena que convierte la radiación óptica que se propaga libremente en una energía localizada en forma de plasmones superficiales. En el pequeño espacio que separa dos nanopartículas se forma un "punto caliente" (*hot-spot*) donde el campo electromagnético está muy amplificado por la presencia de las dos bandas plasmónicas de las nanopartículas. Esta amplificación del campo electromagnético aumenta mucho al dis-

minuir el tamaño del espacio internanopartícula. Así, reduciendo este espacio es posible alcanzar aumentos de la fluorescencia de más de tres órdenes de magnitud. También se puede aumentar variando la estructura geométrica de las nanopartículas, un aspecto en el que se ha avanzado muchísimo en los últimos años con el desarrollo de técnicas de síntesis de partículas anisotrópicas. Sin embargo, para aplicaciones de detección individual de moléculas esta última aproximación tiene el inconveniente de la gran señal de fondo debida a la fluorescencia de las moléculas que se encuentran lejos del “punto caliente”, pero todavía dentro del área de excitación limitada por la difracción. Wenger y sus colaboradores han mostrado que se pueden combinar estas dos aproximaciones colocando una nanoantena dentro del confinamiento espacial de una nanoapertura (figura 5c)². Con esta “nanoantena en una caja” y utilizando un espacio interpartícula de 12 nm, los autores han sido capaces de lograr una reducción del volumen de observación de casi cuatro órdenes de magnitud inferior a las técnicas limitadas por difracción, aumentando al mismo tiempo en tres órdenes de magnitud la señal de fluorescencia. Utilizando la técnica de correlación de fluorescencia, con este dispositivo los autores fueron capaces de detectar biomoléculas individuales a concentraciones micromolares.

Aunque estos constituyen solamente un par de ejemplos de la aplicación de la nanotecnología en medicina, uno más avanzado en cuanto a su aplicación y otro todavía más incipiente, muestran ya la “punta de un iceberg” de posibilidades que se puede entrever en este campo de tanta importancia para la sociedad.

Tal como apuntábamos al comienzo de esta sección, las aplicaciones seleccionadas –por la brevedad y oportunidad de este espacio– han sido algo arbitrarias y no reflejan la inmensidad de aplicaciones que la nanotecnología está desarrollando. Aplicaciones en los sectores de la energía (con el desarrollo de tecnologías energéticas alternativas mucho más eficientes), medio ambiente (detección eficiente y eliminación de sustancias nocivas), producción industrial (desarrollo de catalizadores mucho más eficientes, incluyendo, entre otros, el cambio de oxidantes tradicionales muy contaminantes por la oxidación nanocatalizada con oxígeno atmosférico) afectarán, sin lugar a dudas, a muchos de los sectores económicos actuales.

² Véase Punj *et al.* (2013).

4. CAMBIOS ECONÓMICOS-EMPRESARIALES ASOCIADOS A LA IMPLANTACIÓN DE LA NANOQUÍMICA

Existe una visión general de que la nanotecnología puede ayudar al crecimiento económico, tanto en las economías emergentes como en las desarrolladas, convirtiéndose así en el avance tecnológico más prometedor de este nuevo siglo y ofreciendo un potencial enorme de aplicaciones (tal como hemos visto en el apartado anterior) y de oportunidades económicas para el desarrollo global. Durante la pasada década y como resultado de la expansión de las aplicaciones comerciales, el campo de la nanotecnología ha madurado suficientemente como para llegar al momento de ser capaz de ayudar a las sociedades a alcanzar el objetivo de mejorar sus eficiencias y acelerar el progreso en un amplio intervalo de sectores económicos, entre los que se incluyen la medicina, la energía y la producción industrial. La *National Science Foundation* de los Estados Unidos estima en aproximadamente dos millones el número de trabajadores que se precisarán en nanotecnología a nivel mundial a finales del presente año. Muchos de estos nuevos puestos de trabajo se ofrecerán en compañías pequeñas y medianas de nueva creación. En este sentido, es interesante remarcar que muchas de las grandes compañías han expandido su *portfolio* tecnológico a la nanotecnología para mantener su competitividad. Ejemplos de ese paso dado por grandes empresas hacia la nanotecnología pueden encontrarse en Agfa-Gevaert, Bayer, BASF, Zeiss, Philips, por citar solo algunas que abarcan campos tan diferentes como la óptica, la electrónica, la química y la farmacéutica. Sin embargo, hay que destacar que estas grandes compañías representan solo una proporción muy pequeña en las listas de todas las empresas con dedicación nanotecnológica (Hullman, 2006).

Con todo, hay que reconocer que la “nano” está todavía en sus primeras etapas de desarrollo y descubrimiento, y aún es muy pronto para estimar o predecir con cierto grado de garantía su impacto económico a corto y medio plazo. Lo que sí parece seguro es que la nanotecnología ayudará al crecimiento económico de nuestras sociedades y que sus efectos se expandirán a través de diferentes industrias y sectores del mercado (lo que, a su vez, hará difícil estimar su verdadero impacto económico). Pero la pregunta

planteada recientemente por Guoqun Jin (2015) acerca de si el impacto económico previsto por la implantación de la nanotecnología se distribuirá homogéneamente entre todos los países, nos debería preocupar. Puede que no compáramos su respuesta negativa a dicha pregunta: “solo aquellos países con economías suficientemente saneadas serán capaces de participar en la revolución nanotecnológica”, con el consiguiente aumento de la separación entre países ricos y pobres, pero habrá que seguir de cerca la evolución durante los próximos años y ver cómo y en qué medida influye la *tecnología nano* en el desarrollo global de nuestras sociedades, y si ello aumenta o reequilibra las grandes desigualdades existentes en estos momentos.

5. NANOQUÍMICA EN ESPAÑA

Al objeto de trascender los pensamientos abstractos sobre estas y otras preguntas similares, se expone a continuación un ejemplo concreto de la creación de una empresa de nanotecnología (Nanogap) en España. La empresa nació como una *spin-off* del Grupo de Investigación en Nanotecnología y Magnetismo (Nanomag) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), perteneciente al Instituto de Investigaciones Tecnológicas, hace ahora algo más de ocho años. La creación de esta empresa responde a la concesión de la patente española “Procedimiento para la obtención de clústeres cuánticos atómicos”³. La tecnología desarrollada en esta patente, que más tarde sería extendida a nivel internacional, fue transferida a la empresa Nanogap para su explotación comercial. Desde ese momento, y gracias a la estrecha colaboración en la investigación y el desarrollo de nuevos productos nanotecnológicos entre el equipo investigador de la empresa y el del Grupo de Investigación de la USC, se desarrolló un sólido paquete de más de diez patentes –todas girando alrededor de la primera patente y a un ritmo de más de una patente anual–, lo que constituye, junto con una fuerte posición de libertad de operación (*freedom to operation*, FTO), uno de los pilares más firmes de esta “nano-empresa”, que, en su pequeñísima andadura, ha recibido el premio europeo 2012 *PwC’s prize*, considerándola una de las más prometedoras compañías jóvenes de Europa, así como otros premios nacionales

³ M.A. López-Quintela y J. Rivas, patente número ES2277531B2, 2005.

(Emprendedor XXI, 2011; ENISA Innovación, etc.). En la actualidad, la empresa cuenta con una plantilla de 20 empleados y, desde 2009, dispone de una filial en San Francisco (Nanogap Inc., USA) que, desde este año, dejará de ser puramente comercial y pasará a ser también de producción, dada la importancia del muy activo mercado americano dentro del mercado global de la empresa, centrada también en el muy dinámico mercado asiático y el más pausado, pero seguro, mercado europeo de la nanotecnología.

Nanogap fabrica a día de hoy distintos nanomateriales entre los que se incluyen: clústeres subnanométricos de diferentes metales, nanopartículas esféricas de entre 5 y 50 nm y nanofibras metálicas de alta relación de aspecto. Estos productos, con un amplio espectro de propiedades y beneficios pueden ser aplicados en campos y mercados tan diversos como: los materiales conductores, donde se utilizan para preparar tintas conductoras para electrónica impresa y filmes conductores transparentes para pantallas táctiles (por ejemplo, tabletas y *smartphones*), materiales fotoluminiscentes con propiedades ópticas únicas que permiten su utilización como huellas dactilares para documentos de seguridad o aplicaciones en el diagnóstico médico, aditivos antimicrobianos destinados a barnices, pinturas y plásticos para obtener superficies con altas prestaciones higiénicas, y propiedades terapéuticas para el tratamiento del cáncer. Este amplio espectro de aplicaciones y oportunidades, combinado con un modelo de negocio flexible, permite materializar oportunidades a corto, medio y largo plazo a través del codesarrollo de productos financiados por los clientes, los cuales derivan en la venta de productos (contratos de suministro) y acuerdos de licencias. La financiación total recibida hasta el momento por Nanogap, entre ampliaciones de capital, subvenciones y préstamos blandos, asciende ya a los 7 millones de euros, y el valor total de la compañía se ha incrementado 50 veces en sus ocho años de existencia.

Cabe destacar que el ejemplo de la creación de la empresa Nanogap es uno de los múltiples que han ocurrido en los últimos años en nuestro país, muy poco acostumbrado a esta formación de empresas no solo de base fundamentalmente tecnológica, sino también de tecnologías punta y pioneras, en muchos casos, a nivel mundial. Según el informe de este año, la red

Nanospain⁴ agrupa a unos 340 grupos de investigación y empresas con aproximadamente 2.500 miembros dedicados a la nanotecnología en sus entidades asociadas, tanto públicas como privadas. Si se tiene en cuenta que en Estados Unidos (según datos recientes del *Project on Emerging Nanotechnologies* [PEN])⁵, el número de grupos y empresas es de 1.200, se aprecia la fuerza de este sector en nuestro país, máxime si se considera que su implantación es de apenas una decena de años en un campo tecnológico puntero de reciente creación. Según resultados provisionales del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, CDTI⁶, las entidades españolas han obtenido subvenciones por valor de 260,7 millones de euros por su participación en las convocatorias del plan Horizonte 2020 (H2020) adjudicadas en 2014, lo que implicará una inversión de cerca de 290 millones de euros para la realización de actividades de I+D+i en nuestro país. España, con el 11,2 por ciento, ocupa la tercera posición por el retorno obtenido, únicamente por detrás de Alemania y Reino Unido (con el 16,2 y 15 por ciento, respectivamente). En conjunto, 2.319 entidades de nuestro país han estado presentes en el 34 por ciento de las propuestas presentadas a las convocatorias de H2020 contabilizadas hasta el momento. De estas entidades, 495 han conseguido financiación para realizar 431 actividades de I+D+i, liderando 178 de ellas, de las que 75 son proyectos (16,9 por ciento del total de los adjudicados). A modo de ejemplo, por lo que respecta al caso de la citada compañía Nanogap, desde su constitución en el año 2006 ha obtenido aproximadamente dos millones de euros en ayudas públicas para la financiación de las inversiones de I+D+i entre programas regionales, nacionales y europeos. Todo ello representa una buena indicación de la calidad de la I+D+i actual en nuestro país.

6. PERSPECTIVAS DE FUTURO

El rápido crecimiento observado en las actividades en nanotecnología en los Estados Unidos, con más de 1.600 productos de consumo introducidos desde su inicio en el año 2005, representa un aumento del 24 por ciento

⁴ Véase <http://nanospain.org/nanospain.php?p=h>

⁵ Véase <http://www.nanotechproject.org>

⁶ Los datos de CDTI pueden consultarse en: <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=63115>

respecto del último informe en el año 2010. Ello ilustra –en palabras de David Rejeski, director del PEN– el impacto que ya tiene la significativa y continuada inversión en nanociencia y nanotecnología, tanto desde el sector público como privado, de modo que no existe ningún estado federado estadounidense que carezca de organizaciones involucradas en este campo de vanguardia. De acuerdo con el informe de la compañía Lux Research, el mercado de productos con base nanotecnológica ha aumentado desde 147 mil millones de dólares en 2007 a 3,1 billones de dólares en el presente año y se espera un crecimiento continuado todavía mayor en los próximos años. Dadas estas predicciones, resulta evidente la necesidad de crecer (tanto en el número de grupos de investigación como de empresas dedicadas a la nanotecnología) en los próximos años si no se quiere perder el “tren nanotecnológico”. No se puede, por tanto, bajar la guardia pensando que las condiciones de la nanotecnología en España son suficientemente buenas como para que ya, sin crecer, se pueda garantizar estar a la altura media europea en un futuro próximo. Hay que seguir apostando por un apoyo todavía mucho más decidido en los próximos años, tanto en los procesos de formación de científicos y tecnólogos en el sector, como también en el apoyo financiero a las empresas que empiezan a consolidarse en este campo y a las *starting ups* provenientes de los grupos de investigación. Es en este último aspecto de la financiación –tanto de la investigación como del apoyo a las empresas– donde se puede observar una gran diferencia entre España y los países más desarrollados, pues nuestro porcentaje del PIB dedicado a I+D+i sigue estando a la cola de esos países. Y sin este importantísimo y crucial punto de apoyo, el despegue y sostenimiento de la nanotecnología en España pueden verse seriamente afectados, con lo que se pone en peligro el relativamente buen estado actual en el que nos encontramos. Planes de estudio más ambiciosos que opten claramente por la nanotecnología y la nanociencia; un plan mucho más fuerte de becas en paralelo a esos planes de estudio; una mayor interrelación de las empresas con las universidades y centros de investigación; unos planes muy decididos a promover y aumentar la atracción de buenos investigadores y tecnólogos en “nano” en nuestro país, y una disposición favorable para lograr inversiones más fuertes y a más largo plazo de las entidades financieras (capital-riesgo, etc.) que permitan a las empresas desarrollar todas sus posibilidades

y no se queden en “mínimos” que las hagan a la larga perder sus ventajas competitivas, a favor de otras más tardías que puedan surgir en los países que, por tradición, poseen una gran capacidad de inversión; la promoción de las empresas de base tecnológica entre nuestra sociedad para crear una mayor sensibilidad social de que solo apostando por este camino se podrá crear un empleo y riquezas sostenibles: estos son algunos de los retos que tiene planteada nuestra sociedad en el momento presente. De un planteamiento serio y correcto de estas premisas depende que España pueda estar presente –en la medida que le corresponde– en el grupo de países que lidere la nanotecnología como motor de cambio de nuestra sociedad y no pierda esta gran, y probablemente única, oportunidad.

PUNJ, D. *et al.* (2013), “A plasmonic ‘antenna-in-box’ platform for enhanced single-molecule analysis at micromolar concentrations”, *Nature Nanotechnology*, 8: 512–516.

TINNEFELD, P. (2013), “Single molecule detection: Breaking the concentration barrier”, *Nature Nanotechnology*, 8 (7): 480-482.

TSUZUKI, T. (2009), “Commercial scale production of inorganic nanoparticles”, *International Nanotechnology*, 6: 567-578.

BIBLIOGRAFÍA

CALVO, J.; RIVAS, J. y M.A. LÓPEZ-QUINTELA (2012), “Synthesis of subnanometric nanoparticles”, en BHUSHAN, B. (Ed.), *Encyclopedia of Nanotechnology*, Nueva York, Springer: 2639-2648.

GLAT, M.; SKAAT, H.; MENKES-CASP, N.; MARGEL, S. y E.A. STERN, “Age-dependent effects of microglial inhibition in vivo on Alzheimer’s disease neuropathology using bioactive-conjugated iron oxide nanoparticles”, *Journal of Nanobiotechnology*, 11 (32): 1-12.

GRAAF, M. DE *et al.* (2015), “Transparent conductive films of metal grids made via coaxial electrospinning”, *Printed Electronics Europe*, 29 de abril, Berlín. (<http://www.idtechex.com/events/presentations/transparent-conductive-films-of-metal-grids-made-via-coaxial-electrospinning-006047.asp>).

GRIFFITHS, S. (2014), “Nanotechnology in the food industry”, *Food Science and Technology*, 1 de diciembre (<http://www.fstjournal.org/features/28-4/nanotechnology>).

HULLMANN, A. (2006), *The Economic Development of Nanotechnology-An indicators based analysis*, Comisión Europea (<http://cordis.europa.eu/nanotechnology>).

JIN, G. (2015), “How does nanotechnology impact our economies?” (<https://imeclifesciences.wordpress.com/2015/03/14/how-does-nanotechnology-impact-our-economies/>).