

NANOTECNOLOGÍA: El gran reto de lo pequeño

Itziar Otegui Feliz y Jose Maria Pitarke
CIC nanoGUNE

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7120>

Nanotecnología es tecnología en una escala determinada: la escala del nanómetro, que es la escala de los átomos y las moléculas. Toda la materia conocida está formada por átomos. El origen y la evolución de los seres vivos están basados en los átomos y la interacción electromagnética entre los mismos. Los primeros átomos (hidrógeno y helio) se formaron casi 400.000 años después de la gran explosión que dio origen al Universo. Posteriormente, los átomos se agruparon para formar estrellas, galaxias y, eventualmente, dar origen a la vida.

Un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro. En la escala que va desde 0,1 a 100 nanómetros (desde el radio atómico hasta la longitud de onda de la luz ultravioleta lejana) encontramos los constituyentes básicos de la materia, entre ellos las estructuras biológicas más primitivas: el ADN, el ribosoma y el virus. Pero no es sólo el tamaño lo que importa. El comportamiento de la materia es muy especial en esta escala. Los objetos que encontramos en esta escala son mayores que un solo átomo (podemos tener un buen número de átomos y moléculas) y, al mismo tiempo, suficientemente pequeños como para que sus propiedades sean significativamente diferentes a aquellas en la microescala y en la macroescala. En esta escala, además, la física y la química a menudo dejan de ser distinguibles, y nos encontramos ante una convergencia de disciplinas clásicas tales como la física, la química, la biología y la ingeniería de materiales, dando así lugar a una nueva disciplina: la *nanociencia*. La nanotecnología se dedica al diseño y producción de nuevas estructuras mediante el control de su forma y tamaño a escala *nanométrica*.

El ritmo frenético al que la tecnología nos tiene acostumbrados a avanzar hace complicado explicar que, en este campo, estemos aun sentando las bases. No obstante, lo que conocemos de la nanoescala no deja lugar a dudas sobre el enorme potencial de descifrar las propiedades y funciones de las estructuras básicas de la materia. Y, más allá de conocer cómo son, para qué sirven y cómo funcionan, las aplicaciones de la nanotecnología derivarán de la capacidad, ya real, de transformar la materia molécula a molécula, átomo a átomo, para crear materiales, dispositivos sencillos e incluso máquinas que cumplan funciones determinadas. Estamos, por tanto, poniendo los cimientos necesarios para impulsar un desarrollo científico-tecnológico que podría provocar una nueva revolución económica y social: la nanorevolución.

Conocer y ser capaces de transformar las estructuras nanométricas y sus funciones, creando nuevos materiales y dispositivos con propiedades a la carta, es el reto fundamental de la investigación actual en nanociencia y nanotecnología. Las aplicaciones concretas derivarán de este conocimiento y habilidad, y serán, seguramente, mucho más espectaculares de lo que hoy en día somos capaces de anticipar. Como dijo **Mark Twain**, “*¿por qué no debería la realidad ser más extraña que la ficción? Al fin y al cabo, la ficción debe tener sentido*”.

DE PENSAR EL ÁTOMO, A VERLO Y MOVERLO

La idea de que la materia se compone de unidades discretas que no pueden ser divididas de forma arbitraria en cantidades más pequeñas nos acompaña desde hace milenios; pero estas ideas eran abstractas y se basaban en un razonamiento filosófico, en lugar de en la experimentación y la observación empírica. Las referencias a este concepto nos llevan a la Grecia clásica y a la India, donde distintas escuelas ato-

mistas formularon hipótesis sobre estas cuestiones desde el siglo 6º a. C. Fue el filósofo griego **Demócrito** quien acuñó el término ‘átomo’ en torno al año 450 a. C., que en griego significa “no divisible”. Demócrito propuso que las cosas están formadas por agregación de entidades indivisibles, indestructibles e inmutables, de forma que los griegos emplearon la palabra átomo para referirse a la parte de materia más pequeña que podía concebirse. Sin embargo, la idea básica de átomo no aparece en el mundo científico hasta más de 2.200 años después, cuando comenzó a desarrollarse la ciencia química, de la mano de **Lavoisier**, **Dalton** y **Avogadro**, entre otros. La hipótesis atómica fue cobrando fuerza y, en 1869, **Dmitri Mendeléjev** presentó la tabla periódica de los elementos químicos, la cual clasifica los átomos y describe sus propiedades físico-químicas. Hacia finales de siglo, importantes descubrimientos, entre los que destaca el del electrón de **J. J. Thomson** en 1897, dejaron claro que el átomo no era una partícula de materia sólida e indivisible, y condujeron a los científicos a cuestionarse sobre la estructura atómica. A partir de la propuesta del modelo atómico de **Bohr**, en el año 1913, comienza a desarrollarse la teoría cuántica, la mayor revolución conceptual del siglo XX: un cambio de paradigma científico que dio lugar a una revolución tecnológica sin precedentes.

Con la consolidación de la teoría cuántica y el desarrollo de las tecnologías de microscopía, los físicos de mediados del siglo XX fueron capaces de vislumbrar las posibilidades que ofrecía la nanoescala a pesar de no tener aún las técnicas necesarias para acercarse a ella. Así lo anticipó **Richard Feynman** en una charla visionaria de 1959: “*Los principios de la física, tal y como yo lo veo, niegan la posibilidad de manipular las cosas átomo a átomo. No es un intento de violar ninguna ley; es algo que en principio se puede hacer, pero en la práctica no se ha hecho porque somos demasiado grandes*”. Casi veinte años después, en 1974, el profesor de la Universidad de Ciencias de Tokio **Norio Taniguchi** acuñó por primera vez el término ‘nanotecnología’ para

hacer referencia al proceso de separación, consolidación y deformación de los materiales átomo a átomo o molécula a molécula.

EXPLORAR EL NANOUNIVERSO

Durante las últimas décadas hemos desarrollado herramientas tecnológicas que nos han permitido observar y manipular en la nanoescala. La aproximación *top down* ha permitido producir objetos con mucha precisión a partir de lo grande y, aunque en un principio generaba residuos y consumía mucha energía, su eficiencia ha aumentado con el tiempo.

La otra aproximación es la *bottom up*: partir de lo pequeño. Esto implica una precisión casi absoluta, un control casi completo de los procesos, cantidades mínimas de residuos y un menor consumo energético. Se busca así una ingeniería molecular cuya fuerza de producción sean nanodispositivos “pre-programados” para fabricar las nanoestructuras deseadas, tal como lo hacen de forma natural las macromoléculas en los seres vivos.

Hoy en día, una técnica habitual para fabricar nanoestructuras es la *nanolitografía*, que modifica las estructuras mediante el grabado o la impresión erosionando y depositando nuevo material. Para la erosión se emplea luz (*fotolitografía*) o partículas cargadas

(*litografía por haz de electrones o iones*). La fotolitografía es una de las herramientas principales para la fabricación de circuitos integrados; permite diseñar sobre materiales fotosensibles y obtener patrones por debajo de los 100 nm empleando longitudes de onda corta. La *fotolitografía ultravioleta extrema*, considerada una forma de fotolitografía

de próxima generación, emplea una onda ultracorta de 13,5 nm.

En el proceso de nanofabricación los científicos también necesitan “ver” lo que hacen. De hecho, el hito más importante en la breve historia del campo de la nanociencia y la nanotecnología vino de la mano de **Gerd Binnig** y del recientemente fallecido **Heinrich Ro-**



Fig. 1: Nanolitografía por haz de electrones. Sala blanca de nanoGUNE.

Fuente: nanoGUNE

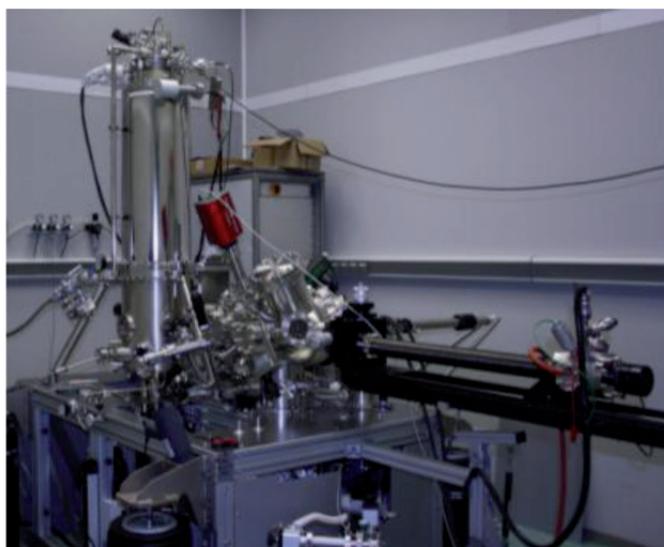


Fig. 2a

Fig. 2a: Microscopio de efecto túnel de nanoGUNE.

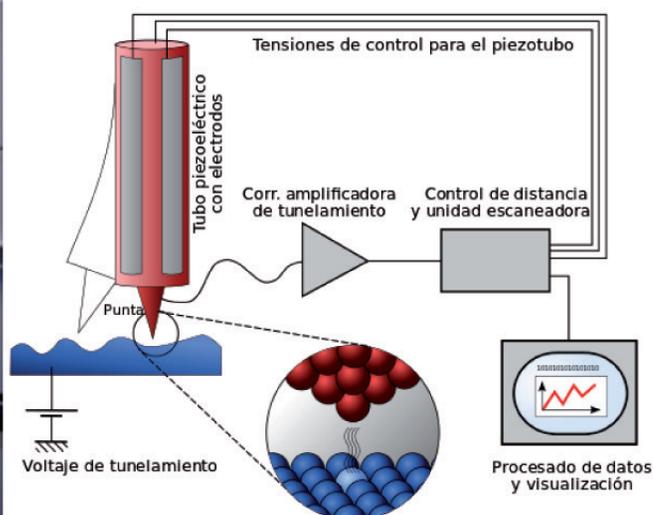


Fig. 2b

Fig. 2b: Esquema de un microscopio de efecto túnel.

Michael Schmid and Grzegorz Pietrzak [CC-BY-SA-2.0-at (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/at/deed.en>)], via Wikimedia Commons.

hrer en 1981. Los dos geniales investigadores diseñaron y construyeron, en el Laboratorio de Investigación de IBM en Zurich (Suiza), el *microscopio de barrido de efecto túnel* (STM, del inglés *Scanning Tunneling Microscope*), con el que obtuvieron las primeras imágenes tridimensionales de superficies con resolución atómica. Por el diseño de este microscopio fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1986.

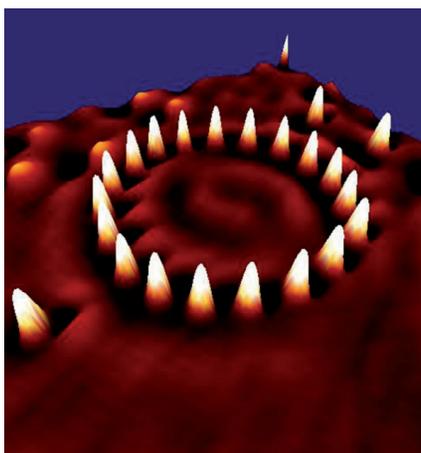


Fig. 3: Átomos de plata sobre una superficie de plata 111, manipulados para dibujar el logotipo de nanoGUNE.

Fuente: nanoGUNE

El *microscopio de efecto túnel* (STM) es un microscopio no óptico que se sirve de los principios de la mecánica cuántica para “ver” superficies; es decir, para obtener información relativa a su estructura. Una punta metálica muy afilada que termina en un átomo se mueve a modo de sonda sobre la superficie del material a estudiar. Aplicando un voltaje entre la punta y la muestra, algunos electrones saltan por efecto túnel de la punta a la muestra (o viceversa, dependiendo de la polaridad); ello da lugar a una corriente eléctrica débil, cuyo valor es extraordinariamente sensible a la distancia entre la punta y la muestra, y permite registrar cambios en esa distancia por debajo de 0,1 nm. La toma de medidas y los movimientos de la punta se realizan mediante un dispositivo piezoeléctrico controlado por el usuario a través de las interfaces correspondientes. El sistema de control electrónico obliga a la intensidad túnel a ser igual a la intensidad prefijada, de tal modo que la punta sube o baja al ser barrida por encima de la superficie (como el

bastón de un ciego, pero sin contacto), ofreciendo al usuario una imagen fiel de la disposición geométrica de los átomos de la superficie. Pocos años después del diseño del primer microscopio túnel, **Donald Eigler** y **Erhard Schweizer** demostraron en otro laboratorio de IBM en Almaden (EEUU) que este microscopio también podía utilizarse para ‘mover’ los átomos uno a uno y construir estructuras artificiales, haciendo realidad la visión de Feynman. Los átomos se recogen uno a uno con la punta y se mueven hasta la posición deseada.

Otro microscopio esencial para explorar la nanodimensión es el *microscopio de fuerza atómica* (AFM), un instrumento mecánico capaz de detectar fuerzas del orden del nanonewton (10^{-9} N). Se registra la topografía de una superficie mediante una punta (como la del microscopio túnel) acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible, de unos 200 μm de longitud. El funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica nos recuerda al de un microscopio túnel, ya que ambos sondan la superficie de una muestra con una punta extremadamente afilada; sin embargo, el principio de funcionamiento ahora se basa en el control de la fuerza atómica existente entre los átomos de la punta y los de la superficie de la muestra. El AFM puede realizar dos tipos de medidas: imagen y fuerza. En el modo imagen, la fuerza interatómica entre la punta y la muestra provoca una flexión del listón que queda registrada mientras se barre la muestra; la señal obtenida entra en un circuito de realimentación que controla un actuador piezoeléctrico, como en el caso del STM. Por otra parte, las medidas de la fuerza interatómica – solo posibles cuando la punta está muy próxima a la muestra – son útiles en estudios de fuerzas de adhesión y permiten estudiar interacciones específicas entre moléculas, así como caracterizar la elasticidad del material. En particular, se pueden realizar estudios de nanoindentación de materiales blandos, los cuales permiten caracterizar propiedades elásticas (módulo de elasticidad) y viscoelásticas de una muestra. También se pueden manipular átomos individuales usando un método puramente mecánico, sin utilizar corrientes eléctricas, como en el caso del STM. El AFM presenta la ventaja adicional de que puede ser utilizado con cualquier

tipo de muestra (muestras conductoras o aislantes, químicas o biológicas...) y en una gran variedad de ambientes (aire, vacío y líquidos).

Una aplicación novedosa del AFM es su utilización para medir las fuerzas mecánicas de las proteínas; básicamente, tirando de ellas hasta que se despliegan. La información obtenida mediante esta técnica puede ser de gran relevancia en el estudio de diversas enfermedades. La *mecanofarmacología*, una de las áreas de estudio que está desarrollando el grupo de nanobiomecánica de nanoGUNE, está orientada a estudiar la mecánica de las proteínas implicadas en patologías humanas e infecciones víricas o bacterianas.



Fig. 4: Simulación de una punta de AFM tirando de una cadena de proteínas.

Fuente: Raúl Pérez-Jiménez

Gracias al desarrollo de éstas y otras novedosas técnicas de nanoscopia y nanofabricación, el mundo académico lleva ya casi tres décadas explorando la nanodimensión. En ella se observan comportamientos novedosos, diferentes a los que encontramos en la microescala y en la macroescala. En la nanoescala, el marco conceptual es la mecánica cuántica, predominan las superficies y, además, las propiedades físicas y químicas dependen del tamaño de los objetos, lo cual no ocurre en la microescala ni en la macroescala. Por ejemplo, las nanopartículas de oro pueden ser naranjas, púrpuras, rojas o verdes dependiendo de su tamaño, mientras que una pieza de oro micro o macro es amarilla independientemente de su forma o tamaño. Por ello, la nanotecnología nos impone un desafío científico además de tecnoló-

gico, porque para poder extraer de ella un rendimiento industrial significativo debemos profundizar en el conocimiento de la materia en la nanoescala. Con todo, se abre la posibilidad de transformar artificialmente la materia en la forma en la que lo hace la misma naturaleza, átomo a átomo, de abajo arriba.

La promesa de la nanotecnología reside en la posibilidad de producir combinaciones únicas de propiedades, funciones y prestaciones en materiales y sistemas, de una manera que había sido imposible hasta ahora. La nanotecnología permite crear materiales y sistemas “*a medida*” mediante la manipulación de sus átomos, más allá de lo que la química tradicional podía ofrecer; la absoluta flexibilidad en el diseño y producción de los materiales dará lugar a una gama infinita de prestaciones que el usuario podrá escoger a la carta. Y, todo ello, con un menor consumo de materia y energía, y una menor generación de residuos. Es por eso que decimos que la promesa de la nanotecnología es dar mucho por poco, más por menos. Sin duda será una de las claves del desarrollo sostenible.

Un ejemplo de nuevos materiales que nos colocan en el terreno de la nanotecnología son los *fullerenos*, los *nanotubos de carbono* y el *grafeno*. En los años ochenta se descubrió, en el espacio interestelar, el fullereno, una molécula de sesenta átomos de carbono con la forma de un balón de fútbol. En los años noventa se descubrieron los nanotubos de carbono, láminas muy finas de grafito enrolladas en forma de tubo; y, finalmente, a principios del presente siglo se demostró que se podía aislar una lámina de grafito con el espesor de un solo átomo: el grafeno. El grafeno consiste en una sola capa de átomos de carbono formando una estructura hexagonal como la de un panal de abejas. Si colocamos un buen número de grafenos uno encima de otro, lo que tenemos es grafito. Si con un solo grafeno formamos una superficie esférica, lo que tenemos es un fullereno. Si enrollamos un solo grafeno para formar una superficie cilíndrica, lo que tenemos es un nanotubo de carbono. El grafeno, la madre de todos los grafitos, ha batido todas las marcas y cuenta con todos los superlativos. No hay estructura cristalina más flexible, no hay material más resistente, es extraordinariamente impermeable,

su conductividad térmica y eléctrica son excepcionales y, además, es transparente. Es ésta la razón por la que se han generado grandes expectativas en relación al desarrollo tecnológico que podría derivarse de la incorporación de este nanomaterial a diversos sectores.

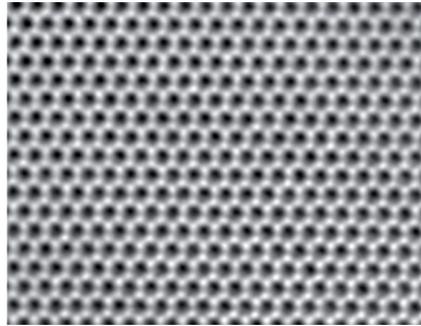


Fig. 5: Imagen obtenida por medio del Microscopio Electrónico de Transmisión
Fuente: nanoGUNE & Graphenea

GRANDES OPORTUNIDADES Y GRANDES RETOS

La posibilidad de manipular la materia a escala nanométrica y de controlar la agregación de estructuras con precisión atómica anticipa la aparición de nuevas formas de producción, con el desarrollo de nuevas industrias e, inevitablemente, la desaparición de otras. Las empresas capaces de adelantarse a los cambios dispondrán de ventajas que las harán más competitivas en el mercado global. Sin embargo, a pesar de que en el mercado ya existe un buen número de productos que deben su valor añadido a la nanotecnología, ésta no se ha introducido aún de lleno en la cadena de producción industrial. Se estima que en las próximas décadas la nanotecnología podría pasar del reconocimiento social de conceptos multidisciplinarios básicos a su aplicación industrial masiva.

Los primeros productos de consumo nacidos de la nanotecnología llevan en nuestras casas desde comienzos de siglo, aunque ni siquiera hayamos sido conscientes de ello: parachoques más ligeros que resisten mejor los golpes y ralladuras, pelotas de golf que vuelan más recto, raquetas de tenis más tensas que hacen que la pelota rebote más rápido, calcetines antibacterianos con nanopartículas de plata, cremas de

sol transparentes, tejidos antiarrugas y antimanchas, cosmética terapéutica de mayor penetración, baterías que se recargan más rápido para dispositivos inalámbricos, transistores ultrarrápidos, y pantallas mejoradas para televisores, móviles y cámaras digitales son algunos de los productos que ha posibilitado la nanotecnología.

A finales de 2010, tras una “*década fundacional*” de I+D orientada a la nanotecnología, se observan importantes cambios en el desarrollo de este campo y, en base a eso, se realizan las previsiones para los próximos 10 años. El número de trabajadores en el campo de la nanociencia y la nanoingeniería ha aumentado de 60.000 a 600.000 en todo el mundo, y los expertos estiman que volverá a multiplicarse por 10 para 2020. La nanotecnología se ha introducido en la mayoría de los sectores industriales y en la medicina, haciendo que el mercado crezca a un ritmo interanual del 25%, alcanzando, según un estudio publicado recientemente por *Lux Research*, los 700 mil millones de dólares en 2012 y el billón de dólares en 2013. Será en esta década cuando el gran esfuerzo destinado a la investigación básica en este campo comience a repercutir en un desarrollo tecnológico con mayor visibilidad y, gracias a su versatilidad, poco a poco, la nanotecnología se expandirá horizontalmente llegando a nuevos mercados. La inversión tanto pública como privada también ha aumentado a nivel mundial. La *Unión Europea* invirtió 4,6 dólares per cápita en 2008, *Estados Unidos* 5,1 dólares y *Japón* 7,3 dólares. La inversión global alcanzó los 18 mil millones de dólares en 2010, y ha crecido en torno a un 40% anual durante los últimos años. Infinidad de resultados en forma de publicaciones científicas, patentes y productos muestran importantísimos avances en campos tan diversos como el de los materiales avanzados, la biomedicina, la catálisis, la electrónica, la farmacéutica, los recursos energéticos, la depuración de aguas o la agricultura, entre muchos otros.

Gracias a una primera fase que expertos como **M. C. Roco** (promotor de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología de EEUU) denominan “*ciencia-centrista*”, tenemos un mejor entendimiento de las estructuras vivas más pequeñas, hemos desvelado los comportamientos y fun-

ciones de la materia en la nanoescala y estamos creando un catálogo de nanoestructuras que serán los ladrillos de futuros dispositivos y sistemas. Para los próximos años se proyecta una integración de la ciencia con la ingeniería, así como una orientación cada vez más marcada por consideraciones socioeconómicas.

Actualmente sólo han encontrado aplicaciones las nanoestructuras relativamente más simples, pero la nanotecnología se ha introducido extensivamente en múltiples sectores, algunos de ellos críticos, como el de los carburantes y la industria química, los semiconductores o la medicina molecular. Así, parece acercarse cada vez más al objetivo marcado por las estrategias nacionales de países como EEUU, Japón o la Unión Europea: la de ser una tecnología transversal con un considerable impacto económico en multitud de mercados.

A pesar de los avances, queda todavía mucho por descubrir y desarrollar. Aun no es posible construir sistemas con funciones predeterminadas por medio del diseño computacional, ni entender la complejidad espacio-temporal de un nanosistema. Por ello, es importante mantener la inversión en las áreas más básicas al tiempo que se da paso a la integración de la ciencia con la tecnología. Solo así se alcanzarán los retos científico-técnicos que se nos presentan y entre los que el *nano report 2020* destaca los siguientes:

- La integración del conocimiento sobre nanoescala y los nanocomponentes en nanosistemas con comportamientos complejos y deterministas, con el objetivo de crear productos completamente nuevos.
- Un mejor control del autoensamblado molecular, el comportamiento cuántico, la creación de nuevas moléculas y la interacción de nanoestructuras con campos externos para construir materiales, dispositivos y sistemas mediante el modelado y el diseño computacional.
- La comprensión de los procesos biológicos e interfaces nano-bio con materiales abióticos, sus aplicaciones biomédicas, sanitarias

y de seguridad, y soluciones nanotecnológicas para los recursos naturales sostenibles y la nanomanufactura.

Los expertos apuntan a que el progreso en el siglo XXI deberá basarse en la convergencia del conocimiento y la tecnología para el beneficio social, y la nanotecnología se presenta como una tecnología clave. Disciplinas científicas “aisladas” han convergido ya para desarrollar la nanociencia. La convergencia nano-bio-info-cognitiva también ha dado pasos importantes al compartir componentes elementales como los átomos, el ADN, los bits y la sinapsis. Por tanto, debemos ahora apuntar hacia la convergencia de toda esta tecnología emergente con las capacidades humanas, sociales y los recursos naturales para tratar de resolver problemas a los que no nos podemos enfrentar con una visión aislada, así como para crear tecnologías, industrias, productos y soluciones orientadas a un mayor bienestar humano y social.

Para esto será necesaria una política pública comprometida y sostenida en el tiempo capaz de anticiparse y adaptarse a los desarrollos. Un aspecto que cada vez está cobrando mayor relevancia y al que también está prestando especial atención la administración pública es la variable de la seguridad (EHS), que debe estar presente en la transición hacia nuevos productos nanotecnológicos. Asimismo, serán igualmente necesarios el apoyo constante a la educación, la preparación de mano de obra cualificada y la puesta en marcha de las infraestructuras necesarias para impulsar la investigación y la integración ciencia-ingeniería.

La estrategia de investigación de la Unión Europea para los próximos años, denominada *Horizonte 2020*, establece como objetivo crear un liderazgo europeo en tecnologías capacitadoras e industriales, entre las que dedicará una atención especial a la nanotecnología. El *Gobierno Vasco* refrenda también su apuesta por la promoción de la nanotecnología como vehículo para impulsar una revolución en el tejido productivo vasco por medio de la estrategia *nanoBasque*, que trabaja con los diferentes agentes de la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación y con las empresas vascas para impulsar

tanto la aplicación de estas tecnologías en la práctica totalidad de los sectores industriales como la creación de nuevas empresas de base nanotecnológica.

PARA SABER MÁS

1. William A. Goddard III, Donald Brenner, Sergey Edward Lyshevski, Gerald J lafrate, eds. *Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology*, CRC Press, 2012 (Tercera edición).
2. I. Campillo and J. M. Pitarke, "Nanotecnología", *Enciclopedia Durvan*, 2007.
3. F. Case. "Nanotechnology Decade", *Chemistry World*, march 2011, pp. 49.
4. M. C. Roco, C.A. Mirkin, Mark C. Hersam, eds. *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020*, Springer, 2010. (www.wtec.org/nano2, consultado en enero de 2014).
5. M. C. Roco, W.S. Bainbridge, B. Tonn, and G. Whitesides, eds. *Converging Knowledge, technology and society: Beyond convergence of nano-bio-info-cognitive technologies*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer., 2013. (<http://www.wtec.org/NBIC2>, consultado en febrero de 2014).
6. M. C. Roco, S. Williams, P. Alivisatos, eds. *Nanotechnology Research Directions: Vision for Nanotechnology in the Next Decade, IWGN Workshop Report*, U.S. National Science and Technology Council, 1999, Washington D.C. (<http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Research.Directions/> consultado en febrero de 2014).
7. www.nano.gov (Consultado en octubre de 2013)
8. <http://www.nanotechproject.org/cpi/> (consultado en febrero de 2014)
9. <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/> (consultado en enero de 2014)
10. www.nanobasque.es (Consultado en febrero de 2014).
11. Hilary Flynn, State of the Market Report on "Nanotechnology Update: Corporations Up Their Spending as Revenues for Nano-enabled Products Increase", Lux Research, 17 de Febrero de 2014.