

saliente en la interpretación actual y a las mayores figuras de la música hoy. A ellos y a sus abonados se debe el que visiten regularmente las salas de conciertos españolas. Los coros tienen sus reductos en festivales como el Certamen Coral de Tolosa, Europa Cantat, etc. Se siguen celebrando festivales de verano en muchas localidades, algunos de tanta tradición como el de Granada, el de Santander, el Festival Mozart de La Coruña, la Quincena Donostiarra, los de Peralada, Torroella de Montgrí, Vilabertrán, etc. Los concursos de piano de Santander, Jaén, Linares, etc, se convocan regularmente y dan sus frutos de modo más irregular.

Uno de los aspectos de la música en España que debe ser destacado es de la discografía. Pese a la tan pregona crisis del disco por la presencia de piratería en la Red de internautas cibernéticos, numerosos sellos discográficos están llevando a cabo una labor importante. Autores que no habían sido grabados jamás, pese a su calidad como tales, empiezan a dejar de ser nombres en un diccionario y pueden ser escuchados gracias al disco. De los consabidos Falla, Albéniz, Granados, Turina, Rodrigo y poco más, hemos pasado a conocer música culta de todos los géneros, producida en el Renacimiento, en el barroco, en el clasicismo, en el romanticismo, durante la etapa nacionalista, en el s. xx y en el xxi. Empezamos a conocer la continuidad que ha tenido la composición en España a lo largo de los siglos y vemos cómo intérpretes extranjeros comienzan a grabar a nuestros polifonistas, maestros de capilla barrocos, zarzuelistas del s. xviii o autores de cuartetos o de música para piano del s. xix.

La musicología internacional ha incrementado su actividad sobre la música histórica española, al tiempo que nuestras instituciones musicológicas no dejan de publicar, incluso discos, lo cual es, por fortuna, un signo de la buena salud de nuestra vida musical hoy.

ANDRÉS RUIZ TARAZONA

## NANOTECNOLOGÍA

**NANOTECNOLOGÍA.** Tecnología dedicada al diseño o creación de materiales, dispositivos y sistemas mediante la manipulación de la materia a escala nanométrica, de milonésimas de milímetro. La tendencia a reducir la materia conocida a sus constituyentes elementales ha sido una constante a lo largo de la historia. Ya hace más de dos milenios los filósofos griegos mostraron esta actitud cuando se dedicaron a explicar la complejidad del mundo, reduciéndola a un juego intrincado de sus constituyentes elementales. Que el mundo material está compuesto de átomos era la hipótesis que el filósofo griego Demócrito sostenía ya hace más de 2400 años. Propone que las cosas están formadas por agregación de entidades indivisibles, indestructibles e inmutables. Son los átomos. Los griegos empleaban la palabra átomo para referirse a la parte de materia más pequeña que podía concebirse. Esa «partícula fundamental», por emplear el término moderno, se consideraba indestructible. De hecho, átomo significa en griego «no divisible». Sin embargo, no se comenzó a prestar más atención al concepto de átomo hasta el s. xix. Con el nacimiento de la química, la teoría atómica entra en el pensamiento científico moderno, al menos de forma sistemática, gracias a Dalton y Avogadro entre otros. John Dalton identificó los elementos químicos con tipos específicos de átomos. Postulando que los átomos tienen pesos diferentes y se combinan en ciertas proporciones fijas para formar compuestos, consigue explicar de modo elemental la ley de las proporciones definidas de Proust y demostrar la suya de las proporciones múltiples. La hipótesis atómica fue cobrando fuerza hasta que en 1869 Dmitri Mendeléiev presentara la tabla periódica de los elementos químicos, de los cuales los átomos serían sus unidades más pequeñas.

Una serie de descubrimientos importantes realizados hacia finales del s. xix dejó claro que el átomo no era una partícula de materia sólida e indivisible. En 1895, el científico alemán Wilhelm Conrad Roentgen anunció el descubrimiento de los rayos X, que pueden atravesar láminas finas de plomo. En 1896, el físico francés Antoine Henri Becquerel comprobó que determinadas sustancias, como las sales de uranio, generaban rayos penetrantes de origen misterioso. Y en 1897, el físico inglés J. J. Thomson descubrió el electrón, una partícula con una masa muy inferior a la de cualquier átomo. Empezaba a estar claro que el átomo debía estar compuesto de partes más pequeñas. La comprobación de que el átomo no es indivisible condujo a los físicos a teorizar sobre la estructura atómica misma. Precisamente la teoría cuántica comienza a desarrollarse sistemática e imparablemente a partir de la propuesta del modelo atómico del joven Niels Bohr en el año 1913. En una década se produjo una auténtica revolución científica que cambió definitivamente nuestra imagen de la naturaleza. La teoría cuántica fue una de las grandes revoluciones conceptuales del s. xx; un cambio de paradigma científico que dio lugar a una revolución tecnológica sin precedentes.

Hoy está bien establecido que los constituyentes «últimos» de la materia se despliegan en el mundo subatómico, uno de los focos de interés de la ciencia más importantes del pasado s. xx. De hecho, los átomos son el resultado del enfriamiento progresivo de la sopa inicial de quarks y leptones que surgió unos instantes después de la Gran Explosión (*Big Bang*). Sin embargo, en lo que a nuestra escala macroscópica se refiere, podemos seguir considerando que los átomos son componentes básicos de la materia. Los átomos de cualquier elemento son iguales aquí que en cualquier otro rincón del cosmos, iguales ahora que cuando se formaron por primera vez después de la Gran Explosión. La evolución del Universo hacia la aparición y desarrollo de la vida se despliega sobre la base de los átomos y de la interacción electromagnética. Los átomos se agregan para formar estructuras muy complejas, como moléculas y cristales, a partir de las cuales va organizándose la materia con diferentes grados de complejidad hasta dar lugar a los cuerpos tal y como los percibimos: extensos, continuos y con un amplio repertorio de propiedades. La teoría atómica es una de las grandes conquistas de la humanidad, y sobre ella se asientan la física, la química y gran parte de la biología modernas.

Nadie como Richard Feynman, genial físico del s. xx, ha sido capaz de ensalzar con mayor entusiasmo y profundidad el sitio del átomo en el universo del conocimiento humano al declarar:

Si, por algún cataclismo, todo el conocimiento quedara destruido y sólo una sentencia pasara a las siguientes generaciones de criaturas, ¿qué enunciado contendría la máxima información en menos palabras? Yo creo que la *hipótesis atómica* (o el hecho atómico, o como quiera que ustedes deseen llamarlo), según la cual «todas las cosas están hechas de átomos, pequeñas partículas que se mueven en movimiento perpetuo, atrayéndose mutuamente cuando están a poca distancia, pero repeliéndose al ser apretadas unas contra otras». Verán ustedes que en esta simple sentencia hay una enorme cantidad de información acerca del mundo, con tal de que se aplique un poco de imaginación y reflexión.

En definitiva, lo que Feynman nos dice es que, básicamente, podemos explicar el mundo que nos rodea y los fenómenos de la naturaleza desde el punto de vista de que la materia está compuesta de átomos que actúan de acuerdo a las leyes de la física.

**La invención de la nanotecnología.** El mismo Richard Feynman, en una famosa charla impartida en el Instituto de Tecnología de California (CALTECH) en diciembre de 1959, afirmó: «Los principios de la física, tal y como yo lo veo, no 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 [...] Pon los átomos donde un químico indica, y ya has hecho una sustancia. Los problemas de la química y la biología podrían ser



resueltos con facilidad si desarrollamos nuestra capacidad para ver lo que hacemos y para hacer las cosas en la escala atómica, un desarrollo que yo creo que no puede ser evitado». El premio Nobel estadounidense se anticipaba así a lo que hoy se conoce como *nanotecnología*, porque, en líneas generales, esta disciplina trata precisamente de la manipulación de los átomos y moléculas para producir materiales, dispositivos sencillos e incluso máquinas.

La charla de Feynman lanzaba el reto de escribir los 24 volúmenes completos de la Enciclopedia Británica sobre la punta de un alfiler. Algunos autores consideran que este desafío inspiró la carrera tecnológica hacia la miniaturización en la construcción de dispositivos mediante un enfoque *top down* (de arriba hacia abajo). Para otros tal reto sembró las imaginativas ideas de Eric Drexler, ingeniero del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que propuso en 1981 la construcción de máquinas moleculares mediante un enfoque *bottom up* (de abajo hacia arriba), usando una suerte de «ensambladores moleculares» para manipular los átomos individualmente. La posibilidad de utilizar el autoensamblaje molecular para construir sistemas nanoscópicos funcionales fue una señal de lo que se avecinaba; pronto se vio la necesidad de un planteamiento multidisciplinar para afrontar los problemas que plantea la nanoescala. El trabajo subsiguiente de Eric Drexler, *Engines of Creation* (1986), se suele considerar como el primer esfuerzo de una presentación sistemática de la nanotecnología. Sin embargo, la mayoría de sus predicciones iniciales no se han cumplido y sus ideas parecen hoy exageradas en la opinión de muchos expertos en nanotecnología, como el reciente desaparecido Richard Smalley, uno de los descubridores de los fullerenos (1986) y premio Nobel de Química.

El término nanotecnología fue acuñado en 1974 por el profesor Norio Taniguchi, de la Universidad de Ciencias de Tokio, en su artículo «Sobre el concepto básico de nanotecnología». En este escrito, presentado en un congreso de la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Precisión, se definía básicamente la nanotecnología como el proceso de separación, consolidación y deformación de los materiales átomo a átomo, o molécula a molécula.

El suceso más importante en la historia de la nanotecnología fue la invención del microscopio de barrido de efecto túnel (STM, del inglés *Scanning Tunneling Microscope*) por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en marzo de 1981, cuando trabajaban en el Laboratorio de Investigación de IBM en Zúrich. Binnig y Rohrer emplearon el microscopio de efecto túnel para obtener las primeras imágenes tridimensionales de superficies con resolución atómica. Por el diseño de este microscopio fueron premiados con el Nobel de Física en 1986. Ese mismo año, Russel Becker y sus colaboradores de los laboratorios AT&Bell usaron un microscopio de efecto túnel para depositar materia sobre una superficie de germanio cristalino; en 1987, John Foster y miembros de su equipo en el Laboratorio de Investigación de IBM en Almadén (California), lograron situar una molécula orgánica sobre una superficie de grafito. Finalmente, dos años más tarde, en este mismo laboratorio de Almadén, Donald Eigler y Erhard Schweizer demostraron que el microscopio de efecto túnel podía utilizarse para manipular las posiciones de átomos individuales. La imagen de las letras IBM escritas con átomos de xenón sobre una superficie de níquel dio la vuelta al mundo (fig. 1). El microscopio de efecto túnel dio paso a una nueva generación de microscopios de barrido por sonda (SPM, del inglés *Scanning Probe Microscopes*) —entre los que destaca el microscopio de fuerza atómica— que han posibilitado la obtención de imágenes de diversos nanoobjetos con resolución atómica, así como la manipulación de estos nanoobjetos sobre diferentes sustratos y condiciones ambientales.

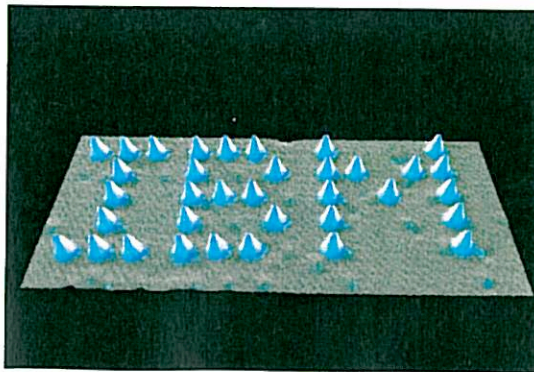
Un nombre importante en la historia de la nanotecnología es, sin duda, el del investigador estadounidense Mihail C. Roco. A finales de los años 90 del siglo pasado estaba convencido de que era necesario un esfuerzo nacional (en lo que se refería a su país) para afrontar los problemas de

la nanoescala. En 1996 había formado un grupo de trabajo que aglutinaba a diversos agentes provenientes de la universidad, la industria, y los laboratorios de investigación norteamericanos con el objetivo de formular una estrategia nacional para el desarrollo de la nanotecnología. Roco tuvo sus «diez minutos de fama» en marzo de 1999, al convencer a los consejeros del entonces presidente Bill Clinton de la importancia de la apuesta de Estados Unidos por la nanotecnología. Su propuesta recibió 490 millones de dólares (sólo 10 millones menos de los que había pedido) y la «Iniciativa Nacional de Nanotecnología» norteamericana fue anunciada en enero de 2000. Dicha iniciativa ha sido el referente para la investigación en nanociencia y su promoción hacia el ámbito industrial en Estados Unidos, llevando a este país a liderar el desarrollo de la nanotecnología. No obstante, numerosos países se han ido subiendo al tren de la tecnología de la nanoescala desde finales del siglo pasado, destacando Japón —con un presupuesto público anual parejo al de Estados Unidos—, Alemania, Reino Unido, Francia, Irlanda, Suiza, la Unión Europea en su conjunto —a través del sexto y del recién estrenado séptimo Programas Marco— y, más recientemente, China. Según el último informe de Lux Research, el gasto mundial realizado en I+D en nanotecnología durante el año 2005 por parte de las administraciones públicas, corporaciones privadas e inversores de capital riesgo ascendió a más de 9000 millones de euros, un 10% más que en 2004. Hoy en día parece haber consenso en que la nanotecnología será uno de los motores de crecimiento económico del s. XXI.

**Una nueva disciplina.** Un nanómetro es la milmillonésima parte del metro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), una medida equivalente a la cienmilésima parte del diámetro de un pelo humano. Visto desde lo pequeño, un nanómetro es aproximadamente diez veces el diámetro de un átomo de carbono. La nanoescala comprende distancias que van desde 0,1 nanómetros hasta unos 100 nanómetros. Sin embargo, quizá sea más adecuado afirmar que algo es etiquetado como *nano* (del griego *νάνος*, enano) cuando al menos una de sus dimensiones es mayor que la de un átomo, pero lo suficientemente pequeña como para que exhiba propiedades que no se observan en la macroescala.

En la nanoescala podemos esperar comportamientos novedosos, muy diferentes de los que encontramos a escala subatómica (por debajo de 0,1 nanómetros) y de los que se observan en la macroescala (por encima de 100 nanómetros). Comprendemos bien tanto el régimen puramente atómico y molecular como el de la materia condensada, pero no así los fenómenos que se suceden en el mundo de la nanoescala; en él predominan las interfaces y superficies y el recorrido libre medio de los electrones y la longitud de onda de la luz son comparables a las dimensiones de las nanoestructuras; por ello, la conductividad eléctrica, la respuesta óptica o el magnetismo dependen del tamaño, la composición y la geometría de los nanoobjetos. Nada de esto ocu-

Fig. 1. Las siglas IBM, escritas sobre una superficie de níquel utilizando átomos de xenón [© IBM]





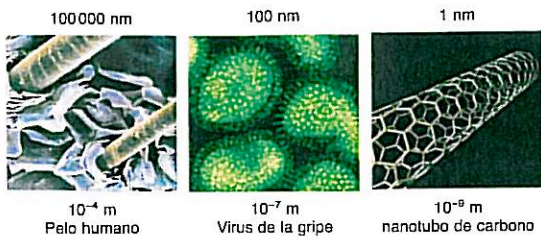


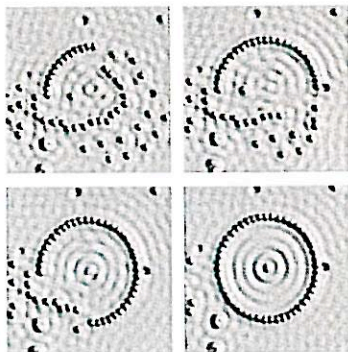
Fig. 2. Visualización de diferentes objetos en su escala correspondiente.

rrer en la macroescala. Por ejemplo, las nanopartículas de oro pueden ser naranjas, púrpuras, rojas o verdosas dependiendo de su tamaño, mientras que una pieza de oro micro o macro es amarilla independientemente de su forma o tamaño. Los procesos químicos, mecánicos y electrónicos son inseparables en la nanoescala, a diferencia de lo que sucede en escalas superiores. La nanotecnología nos impone un desafío científico además de tecnológico; para poder extraer de ella un rendimiento industrial significativo tendrá que madurar antes una nanociencia; obsérvese que no fue éste el caso de la microtecnología (no hubo una «microciencia»).

La nanociencia es la ciencia que estudia los fenómenos y la manipulación de la materia a escala nanométrica, mientras que la nanotecnología se dedica al diseño y creación de materiales, dispositivos y sistemas a través del control de la materia en la nanoescala. En la nanoescala se dan cita fenómenos en los que no se puede separar fácilmente lo que es física de lo que es química. Al mismo tiempo, hay mucho que aprender de los procesos biológicos que operan a escala molecular, a la vez que se busca manejar la materia para dar lugar a nuevos sistemas. Por ello, la nanociencia y la nanotecnología tienen un enfoque interdisciplinar en el que convergen la física, la química, la biología y la ingeniería de materiales. Este hecho supone un valor añadido para el avance del conocimiento y la tecnología, al acercar comunidades científicas que han trabajado largo tiempo de forma independiente.

**La nanotecnología es revolucionaria.** La nanotecnología parte de «cosas extraordinariamente pequeñas», como son los átomos y las moléculas, para obtener resultados macroscópicos por agrupación, estructuración y manipulación de esos elementos diminutos; en el fondo, eso mismo hacemos los organismos vivos. Los ribosomas celulares, partiendo de la información del ADN transcrita en ARN, ensamblan un conjunto de aminoácidos para formar proteínas, los ladrillos básicos con los que se construye la materia viva. Los ribosomas, con un tamaño que ronda los 30 nm, constituyen un ejemplo natural de «ensamblador molecular» drexleriano.

Fig. 3. Generación de un «corral cuántico» con átomos de hierro sobre una base de cobre. [© IBM]



La producción a partir de lo grande (aproximación *top down*) ha permitido desarrollar objetos con cierta precisión, pero, al mismo tiempo, ha significado generar residuos y consumir mucha energía. Aunque en la evolución de esta tecnología la precisión ha aumentado y la contaminación ha disminuido su filosofía de «construcción» no ha cambiado.

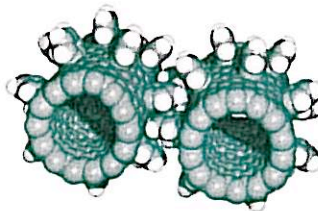
Partir de lo pequeño (aproximación *bottom up*), sin embargo, implica una precisión prácticamente absoluta —sería absoluta al nivel de manipulación de un solo átomo—, un control casi completo de los procesos, cantidades despreciables de residuos y un menor consumo de energía. Se prevé así una futura ingeniería molecular con una fuerza productiva basada en nanodispositivos, nanomáquinas y nanorrobots que trabajen de manera análoga a como lo hacen las macromoléculas en los seres vivos. En efecto, el autoensamblaje molecular, o ensamblaje de nanoestructuras sin la intervención de un agente externo al sistema, se configura como la herramienta *bottom up* por excelencia de la nanotecnología.

Se abre ahora la posibilidad de transformar artificialmente la materia en la forma en la que lo hace la misma naturaleza, átomo a átomo, de abajo hacia 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 abre la puerta para 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. La promesa de la nanotecnología es dar mucho por poco, más por menos. Sin duda será una de las claves del desarrollo sostenible.

Los nuevos materiales, productos y procesos acabarán estando presentes en todos los objetos que nos rodean cotidianamente. Gracias a ellos los ordenadores serán más rápidos y los dispositivos electrónicos más pequeños, los automóviles y los edificios contarán con todo tipo de sensores, y el aumento de las prestaciones de los combustibles aligerará los materiales estructurales de los medios de transporte, con lo que se reducirán los consumos y las emisiones. Tendrá un alto impacto en la medicina y en las ciencias de la vida, dando lugar a fármacos más selectivos y con menores efectos secundarios, posibilitando nuevas terapias y mejorando las herramientas de diagnóstico.

**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, desaparición de otras. Las empresas capaces de adelantarse a los cambios derivados del desarrollo de la nanotecnología dispondrán de ventajas que las harán más competitivas en el mercado global. Para lo que promete, la nanotecnología se ha introducido aún escasamente en la cadena de producción industrial. No obstante, ya se encuentran en el mer-

Fig. 4. Máquina molecular formada por dos nanotubos. [© NASA]





Nanotecnología

cado productos que deben su valor añadido a la nanotecnología y que además resultan asequibles. Entre ellos se podrían citar, por ejemplo, catalizadores para combustibles de automóvil, cremas de protección solar que contienen nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{ZnO}$ , recubrimientos resistentes a la abrasión, composites poliméricos reforzados con nanoarcillas (se utilizan en automoción y embalaje), textiles repelentes al agua, vidrios autolimpiables y espejos antiniebla. Esta lista es sólo un pequeño indicador de lo que la nanotecnología ha volcado ya al mercado.

No existe ningún sector industrial que no pueda beneficiarse en alguna medida de la nanotecnología. Sin embargo, los sectores industriales que pueden ejercer un mayor efecto tractor en el despegue industrial de la nanotecnología son la electrónica, la química, la farmacia y la producción de materiales (plásticos, metales, vidrios, textiles, etc.). Según estimaciones de la compañía BASF, el mercado de la nanotecnología va a experimentar en los próximos años un crecimiento del orden de 10-15% anual. Esta previsión coincide con el último informe emitido por Lux Research, según el cual la venta de productos que incorporen nanotecnología llegará a representar el 15% de la facturación del sector manufacturero global en 2015, frente al 0,1% de 2004.

Sin embargo, aún estamos lejos de contar con las fabulosas nanomáquinas o nanorrobots que anticipa la literatura de ficción. Los retos para que se cumpla la promesa de la nanotecnología son extraordinarios. Incluyen, por ejemplo, el control sobre la distribución de tamaños y formas de los nanocomponentes, la dispersión de constituyentes nanométricos, la comprensión y el ajuste del papel de las interfaces entre fases estructural y químicamente diferentes, y, por supuesto, la producción a gran escala, rentable, controlada y segura de nanomateriales y nanodispositivos. Además no hay que olvidar que cuando una nueva tecnología está a punto de irrumpir en la sociedad se abren frentes de opinión —a veces sin la información suficiente— opuestos a su avance y a su llegada al ciudadano. Esto podría llegar a ocurrir con la nanotecnología, hacia la cual ya se han alzado algunas voces que no confían en el alcance de los beneficios que promete y que destacan los riesgos que, sin duda, puede entrañar. Porque cuando decimos que «lo pequeño es diferente» estamos afirmando que los nanomateriales no pueden ser considerados sólo como sustancia a una escala muy pequeña, pues tienen propiedades radicalmente distintas a las de los materiales macroscópicos y sus efectos sobre las personas y el medio ambiente también pueden ser muy diferentes. Por ello, la nanotecnología requiere la definición de nuevos estándares, que podrán afectar a la terminología, los ensayos, la instrumentación o cualquier otra práctica, y serán condición necesaria para facilitar la comercialización de sus productos.

NANOSCOPIA Y NANOFABRICACIÓN

La técnica más común de fabricación de nanoestructuras es la llamada nanolitografía, o litografía a escala del nanómetro, que utiliza diversas técnicas de modificación de superficies como el grabado o la impresión. Los elementos principales de los que se vale para realizar la erosión de las superficies son la luz y las partículas con carga; se habla así de *fotolitografía*, de *litografía por rayo de electrones* y de *litografía por rayo de iones*. Con la fotolitografía —una de las herramientas principales para la fabricación de circuitos integrados— se diseña sobre materiales fotosensibles y se pueden obtener patrones por debajo de los 100 nm empleando longitudes de onda corta (alrededor de 200 nm). La litografía ultravioleta extrema, con onda ultracorta de 13,5 nm, se considera una forma de fotolitografía de próxima generación. La litografía de rayo de electrones es similar a la fotolitografía (usando electrones en vez de fotones), y la litografía de rayo de iones (a menudo, de galio) presenta cierta analogía con la microscopia electrónica de barrido. Se utiliza como técnica de imagen, de litografía, de deposición o para preparación de muestras en microscopia electrónica de transmisión, aunque es destructiva pues daña la superficie de la muestra y produce implantación iónica.

Otras técnicas de nanofabricación litográficas son la *litografía por nanoimpresión*, que permite crear nanopatrones por deformación mecánica de polímeros, al tiempo que son curados con calor o luz ultravioleta; y la *nanolitografía dip pen*, utilizando un microscopio electrónico de barrido cuya punta («pluma») se recubre («moja») con una molécula que se puede transferir a una superficie, del mismo modo que la tinta se deposita en un papel.

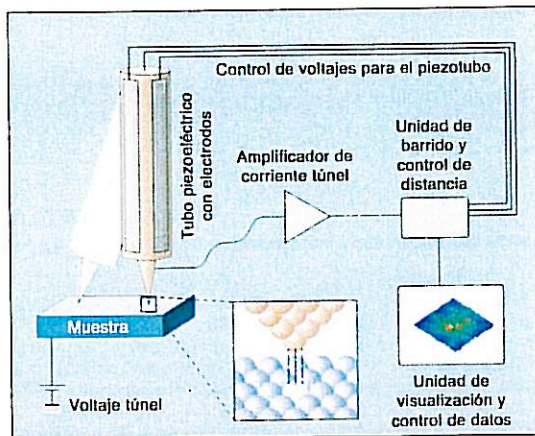
Para diseñar y ensayar nanodispositivos los científicos necesitan «ver» lo que hacen; la microscopia electrónica se convierte aquí en una herramienta fundamental. Los microscopios más interesantes para las nanociencias son los electrónicos de barrido, como el de efecto túnel y el de fuerza atómica.

**Microscopio de barrido 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 (fig. 5). Una punta metálica muy afilada (terminada en un átomo) se mueve sobre la superficie del material a estudiar. Por medio de una corriente eléctrica se obtiene un voltaje entre la punta y la superficie de manera que los electrones saltan por efecto túnel de la punta a la superficie (o viceversa, dependiendo de la polaridad); ello da lugar a una corriente eléctrica débil, cuyo valor depende exponencialmente de la distancia entre la punta y la muestra y permite registrar cambios hasta de 0,05 nm (50 picómetros) en esa distancia. 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 (por ejemplo, mediante un ordenador de sobremesa). En principio, para que se establezca una corriente túnel, la muestra ha de ser metálica o semiconductor.

El microscopio de barrido de efecto túnel ofrece imágenes de superficies con resolución atómica (fig. 6a). En esencia, el proceso consiste en realizar un barrido sobre la muestra a intensidad de corriente túnel constante. El sistema de control electrónico sube o baja la punta (o la muestra) de modo que sea capaz de medir la intensidad túnel prefijada, produciendo así una imagen fiel de la densidad electrónica de la superficie barrida y, por lo tanto, de la disposición geométrica de los átomos (topografía atómica).

El STM permite, además, manipular átomos individualmente para construir estructuras artificiales (fig. 6b). Para poder realizar la manipulación atómica hay que ajustar convenientemente parámetros como el campo eléctrico, la corriente túnel, y las fuerzas de van der Waals entre la punta y la muestra (variando la separación entre ambas). La manipulación átomo por átomo puede realizarse horizontal o verticalmente, recogiendo el átomo con la punta y moviéndolo hasta la posición deseada.

Fig. 5. Esquema de funcionamiento de un microscopio de barrido de efecto túnel.





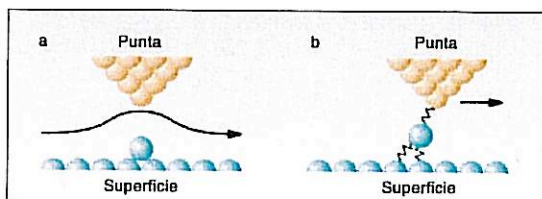


Fig. 6. El microscopio STM permite la formación de imágenes con resolución atómica (a) y la manipulación puntual de los propios átomos (b).

**Microscopio de fuerza atómica (AFM).** Es un instrumento mecánico capaz de detectar fuerzas del orden del nanonewton ( $10^{-9}$  N). Registra la topografía de una superficie mediante una punta (sonda) afilada de forma piramidal o cónica, acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible, de unos 200  $\mu$ m de longitud. El funcionamiento de un microscopio de fuerza atómica nos recuerda al de un microscopio de efecto túnel, ya que ambos barren una superficie con una punta extremadamente afilada; sin embargo, el principio de funcionamiento del AFM es muy diferente, pues se basa en las fuerzas de interacción 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 —sólo 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 efecto, se pueden realizar estudios de nanoindentación de materiales blandos, que permiten caracterizar las propiedades elásticas (módulo de elasticidad) y viscoelásticas de una muestra. También permite 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 (conductoras o aislantes, químicas o biológicas...) y en una gran variedad de ambientes (aire, vacío y líquidos).

IGOR CAMPILLO; JOSE M.<sup>a</sup> PITARKE

### Bibliografía

Drexler, E., *Engines of Creation: the Coming Era of Nanotechnology*, Anchor (1987); Ratner, M. A., y Ratner, D., *Nanotechnology: a gentle introduction to next big idea*, Prentice Hall (2002); Meyer, E., Hug, H. J y Bennewitz, R., *Scanning Probe Microscopy: the Lab on a Tip*, Springer (2003); Pole, C. P. y Owens, F. J., *Introduction to Nanotechnology*, Wiley-Interscience (2003); Bhushan, B. (ed.), *Handbook of Nanotechnology*, Springer (2004); Ventrà, M. Di, Evoy, S. y Heflin, J. R. (eds.), *Introduction to Nanoscale Science and Technology*, Springer (2004); Wolf, E. L., *Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience*, Wiley-VCH (2006); Edwards, S. A., *The Nanotech Pioneers*, Wiley-VCH (2006).

## NARMADA

**NARMADA\***, también llamado **Narbada** o **Nerbudda**. Río que nace en la sierra de Maikalaa, estado de Madhya Pradesh (India), pasa luego brevemente por el de Maharashtra y termina en el de Gujarat, donde desemboca en el golfo de Cambay por un amplio estuario, después de un curso de 1312 km. La gran mayoría de los 97 410 km<sup>2</sup> de su cuenca corresponde a Madhya Pradesh (85 858 km<sup>2</sup>).

Es navegable en unos 80 km. Buena parte de su curso discurre a través de los montes Satpura y la cordillera Vindhya. Forma el límite tradicional entre el Indostán y el Decán, y en carácter sagrado —según la tradición hindú— sólo le supera el Ganges. En sus orillas abundan los lugares de peregrinación.

En 1946 se inició un vasto plan de aprovechamiento hídrico y eléctrico del río Narmada y sus afluentes, si bien su ejecución efectiva iba a sufrir considerables demoras: el entonces primer ministro, Jawaharlal Nehru, puso la primera piedra el 5 de abril de 1961, mientras que la presa principal, Sardar Sarovar, iniciada en 1987, no quedaría terminada hasta el 1 de enero de 2007. El plan comprende una treintena de grandes presas, unos 3000 embalses pequeños, una red de 66000 km de canales y acequias, el regadío de cerca de dos millones de hectáreas y un potencial hidroeléctrico de 1450 MW.

De estas cifras, a la presa de Sardar Sarovar, de 1200 m de largo y 163 de altura máxima, le corresponden una cuenca de drenaje de 88000 km<sup>2</sup> (o sea, el 90% de la cuenca total del Narmada) y un potencial hidroeléctrico de 1200 MW. El embalse que forma anega una superficie de 37690 ha y alcanza una cola de 214 km de longitud —en la cota de máximo llenado, fijada en 140,21 m—; la anchura media es de 1,77 km.

Los costes sociales y ambientales del plan —inundación de aldeas, desplazamiento de unas 100000 personas, pérdida de grandes masas forestales— suscitaron una fuerte oposición. En concreto, el embalse anegó 11 279 ha de tierras agrícolas y 13 542 de bosques; 245 aldeas de los tres estados resultaron afectadas en mayor o menor grado, incluidas tres que quedaron sumergidas en Gujarat.

## NATACIÓN

**NATACIÓN\***. Destacan en este deporte, en los últimos años, los campeonatos del mundo en piscina corta de 2006, los campeonatos de Europa en piscina larga, también de 2006 y los campeonatos del mundo en piscina larga celebrados en Melbourne (Australia) en 2007.

En los mundiales de 2006 en piscina corta celebrados en Shanghai (China) las grandes figuras fueron la australiana Lisbeth Lenton, con cinco medallas de oro, en 50 y 100 m libre, 100 m mariposa y relevos 4  $\times$  100 m estilos y 4  $\times$  200 m libre, y una de plata, en 4  $\times$  100 m libre. En las pruebas masculinas destacaron el australiano Matthew Welsh, que consiguió cuatro medallas de oro (50 y 100 m espalda, 50 m mariposa y el relevo 4  $\times$  100 m estilos) y una de bronce (200 m espalda), el sudafricano Ryk Neethling, que logró tres oros (100 y 200 m libre y 100 m estilos individual), el estadounidense Ryan Lochte, también con tres oros (200 m espalda, y 200 y 400 m estilos), el ucraniano Oleg Lisogor con dos (50 y 100 m braza), y el ruso Yuri Prilukov, medalla de oro en 400 y 1500 m libre.

En los europeos en piscina de 50 m, celebrados en Budapest en 2006, las figuras más destacadas fueron la francesa Laure Manaudou, que consiguió cuatro medallas de oro (400 y 800 m libre, 100 m espalda y 200 m estilos) y tres de bronce (200 m libre, y los relevos 4  $\times$  100 m estilos y 4  $\times$  200 m libre) y la alemana Britta Steffen, también con cuatro oros (50 y 100 m libre, y los relevos 4  $\times$  100 y 4  $\times$  200 m libre). En las pruebas masculinas, el ruso Arkady Viatchanin logró tres oros (100 y 200 m espalda, y relevo 4  $\times$  100 m estilos). Consiguieron dos oros el ruso Yuri Prilukov (400 y 1500 m libre), y el húngaro Laszlo Cseh (200 y 400 m estilos individual).

Los XII Campeonatos del Mundo en piscina de 50 m se celebraron en Melbourne en 2007. Sobresalió en ellos el estadounidense Michael Phelps, que consiguió siete medallas de oro, de ellas cinco en pruebas individuales (200 m libre, 100 y 200 m mariposa, y 200 y 400 m estilos),