

INTERVENIR EN EL MUNDO DE LOS ÁTOMOS, FEYNMAN Y LOS FULLERENOS

Marcos Manuel Sánchez Sánchez
Licenciado en CC. Químicas. Investigador

RESUMEN

Hace medio siglo el físico Richard Feynman, ganador del Premio Nóbel, fue invitado a pronunciar un discurso en una institución tecnológica de California. Lo que manifestó en aquella intervención influiría para siempre en las generaciones futuras interesadas por la exploración del enorme potencial de un universo a escala atómica.

Una derivada de aquel momento y punto de desarrollo es el descubrimiento de los *fulerenos* (también conocidos como "bucicyballs"), que ha abierto un nuevo campo para la química del carbono, y que han beneficiado a diversos campos científicos, entre ellos la Biomedicina, como se pone de manifiesto en el presente artículo.

Todo empezó cuando...

Hace medio siglo el físico Richard Feynman, ganador del Premio Nóbel, fue invitado a pronunciar un discurso en una institución tecnológica de California. Lo que manifestó en aquella intervención influiría para siempre en las generaciones futuras interesadas por la exploración del enorme potencial de un universo a escala atómica:

"Los principios de la física, tal y como yo los entiendo, no niegan la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo... Los problemas de la química y la biología podrían evitarse si desarrollamos nuestra habilidad para ver lo que estamos haciendo, y para hacer cosas al nivel atómico". Fue la primera vez que se hizo pública la visión *de intervenir en el orden de los átomos*.

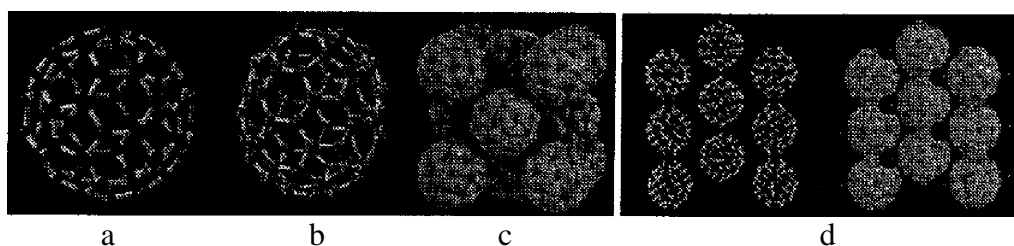
Muchos no supieron profundizar en el sugerente discurso de Feynman; otros lo verían como algo lejano en el tiempo y pensarían que tan largo plazo no les permitiría disfrutar del avance. Así las cosas, el propio Feynman no insistió más en sus ideas y todo permaneció inmutable hasta que a principios de los ochenta, *Erie Drexler*, estudiante de pregrado del prestigioso MIT (Instituto Tecnológico de Massachussets), planteó la posibilidad de idear sistemas de ingeniería a escala molecular. En 1986, dio forma a sus inquietudes publicándolas en un libro titulado "Los motores de la creación". La obra es considerada un clásico por los entusiastas de este naciente universo. Hoy en día, Drexler es presidente del Foresight Institute, entidad de prestigio mundial en investigación sobre nanotecnología.

El descubrimiento de los fulerenos (también conocidos como "bucicyballs") ha venido generando una enorme expectación y ha abierto un nuevo campo para la química del carbono. Como los fulerenos son esencialmente cajas huecas cerradas hechas de átomos de carbono, pueden ser manipulados de muchas maneras para producir materiales nunca vistos. Los "balones" pueden, por ejemplo ser dopados con átomos o introducidos en túbulos y rellenos con metales para conseguir propiedades de superconductividad a alta temperatura. Los investigadores pueden ahora crear sus propias *buckyballs* en un proceso que es casi tan simple como hacer hollín, resultando así esta investigación tan económica como exótica (lo que ha contribuido sin duda a su popularidad). Los fulerenos se obtuvieron por primera vez de forma casual al irradiar una superficie de grafito (variedad alotrópica del carbono) con un láser.

Cuando el vapor resultante se mezcló con una corriente de helio, se formó un residuo cristalizado cuyo estudio reveló la existencia de moléculas constituidas por sesenta átomos de carbono. Como se dedujo en un principio, estas moléculas tenían una geometría semejante a la de la cúpula geodésica diseñada por el arquitecto Buckminster Fuller, con motivo de la exposición universal de 1967. Por ello, se conoce a esta familia de moléculas como fulerenos.

Los investigadores anticipan que los "buckyballs" ofrecerán posibilidades ilimitadas en el desarrollo de nuevos productos, medicamentos y los más diversos materiales.

Así, el campo de la biomedicina se ha visto beneficiado por la aparición de los fulerenos. El estudio de las propiedades de ciertos derivados organometálicos de los fulerenos solubles en agua, reveló que *han mostrado una actividad significativa contra los virus de inmunodeficiencia causantes de la enfermedad del SIDA, VIH-1 y VIH-2*. También se considera la posibilidad de incorporar fulereno en los *procesos de fototerapia*, que permitirían la *destrucción de sistemas biológicos dañinos* para los seres humanos.

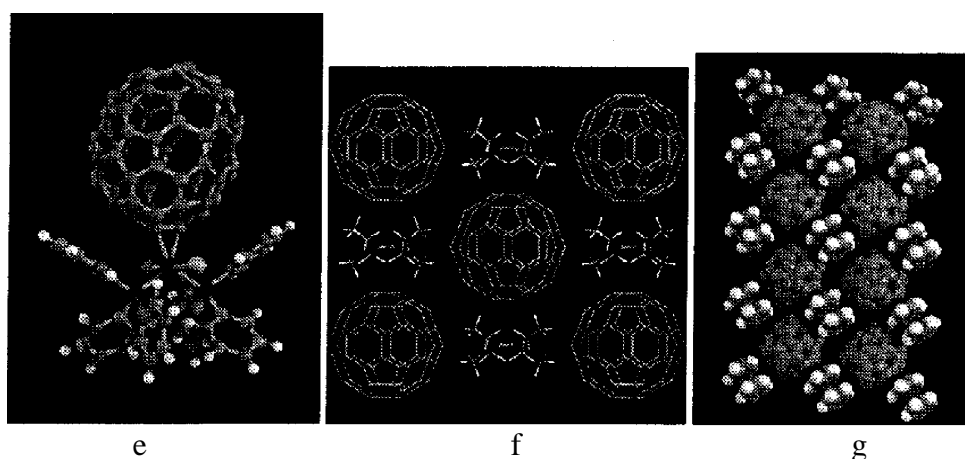


Imágenes del Extropy Institute

© 2002 Extropy Institute. All rights reserved. 13428 Maxella, #273, Marina del Rey, CA 90292 310-823-3594

- a) Buckminsterfullerene, C₆₀, la molécula que lo empezó todo.
- b) C₇₀, el hermano mayor del C₆₀.
- c) C₆₀-Fullerene a 153 grados Kelvin. C₆₀ cristaliza en sistema cúbico centrado en las caras. H.B. Burgi, E. Blanc, D. Schwarzenbach, Shengzhong Liu, Ying-jie Lu, M.M. Kappes, J.A. Ibers, *Angew Chem, Int Ed. Engl*, 31, p. 640, 1992.
- d) Cadenas poliméricas de fullereno en RbC₆₀.

Peter W. Stephens, G. Bortel, G. Faigel, M. Tegze, A. Janossy, S. Pekker, B. Oszlanyi, and L. Forro, *Nature*, 370, 1994 p. 636-639.

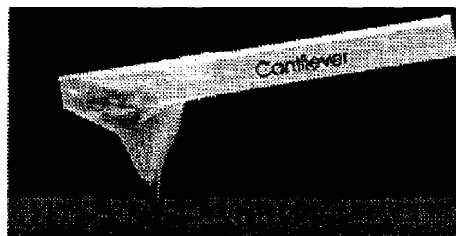


- e) eta²-C₇₀-Fullerene)-carbonyl-chloro-bis(triphenylphosphine)-iridium
A.L. Balch, V.J. Catalano, Joong W. Lee, M.M. Olmstead, S.R. Parkin, *J. Am. Chem. Soc.*, 113, p. 8953, 1991
[CSD-JOHGOC]
- f) C₆₀-Fullerene tetrakis(dimethylamino) ethylene, an itinerant ferromagnet
P.W. Stephens, D. Cox, J.W. Lauher, L. Mihaly, J.B. Wiley, P.M. Allemand, A. Hirsch, K. Holczer, Q. Li, L.D. Thompson, F. Wudl, *Nature (London)*, 355, p. 331, 1992
- g) bis(Ferrocene) C₆₀-fullerene a 143 grados Kelvin.
J.D. Crane, P.B. Hitchcock, H.W. Kroto, R. Taylor, D.R.M. Walton, *J. Chem. Soc., Chem. Comm.*, p. 1764, 1992
[CSD-KUVNOE]

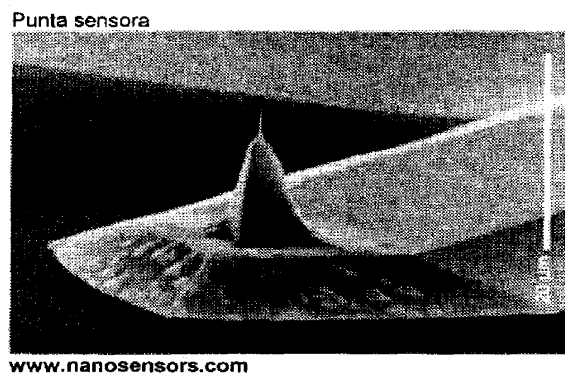
1. EL MICROSCOPIO DE FUERZA ATÓMICA

El profesor Hari Manoharan de la Universidad de Stanford , ha realizado experimentos de manipulación de átomos individuales con *microscopios de fuerza atómica*. El microscopio de fuerza atómica es un dispositivo consistente en una *cabeza senara* cuya *punta ultrafina* entra en contacto con el material y es capaz de detectar átomos individuales. Según indica Miguel Ángel Medina Torres, Profesor Titular en el Departamento de Biología Molecular y Bioquímica de la Universidad de Málaga, esta aguja del microscopio de fuerza atómica puede considerarse una nanoherramienta que permite manipular moléculas aisladas www.ciencias.uma.es/publicaciones/encuentros/ENCUENTROS78/biornaleculas.htm. La aguja hace un barrido sobre la muestra y las vibraciones que se obtienen son leídas a través de un láser. Este microscopio es capaz de "sentir" cómo cambia la fuerza de atracción entre la punta y la superficie que está observando pudiéndose estudiar verdaderos mapas "topográficos" de la superficie de los materiales. El SPM incluye las técnicas de STM (scanning tunnelling microscope) y AFM (atom force microscope).

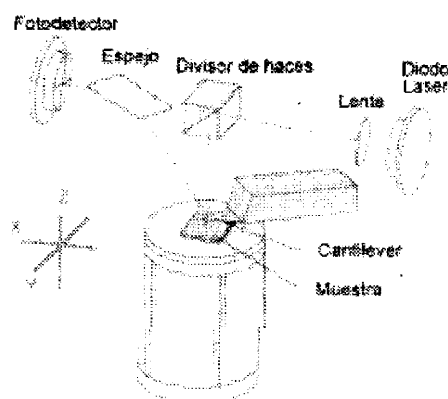
Opera posicionando una pequeña punta (cantilever) cerca de la superficie de la muestra y midiendo luego la fuerza atómica entre ambas www.nanosensors.com



Longitud del cantilever: 200 micras

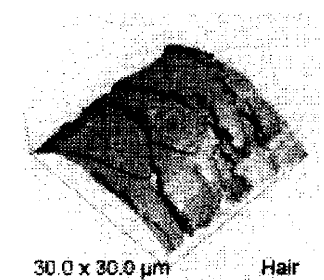


Mediante el uso del microscopio de fuerza atómica es posible acomodar átomos formando distintas figuras geométricas. Esa información se muestra en la pantalla de un computador, donde aparece la topografía de la superficie observada.

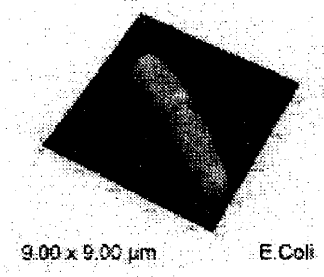


Esquema de funcionamiento de un microscopio de fuerza [atómica](http://www.nanosensors.com).www.nanosensors.com

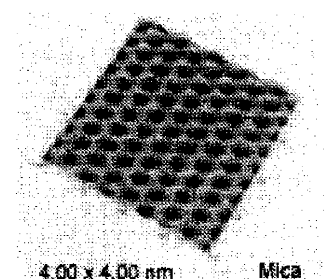
A continuación se muestran algunas imágenes obtenidas con un microscopio de fuerza atómica SHIMADZU SPM-9500. En cada caso se indican las dimensiones del área estudiada.



Cabello: se pueden diferenciar características individuales a partir de las cutículas. Se observan adherencias en las "grietas".



E.coli: este es un bacilo coliforme que fue "anclado" sobre una base de vidrio. La zona central constreñida es el sitio de la división.



Mica: imagen atómica de alta magnificación del plano de clivaje de la mica. Se puede amplificar varias millones de veces

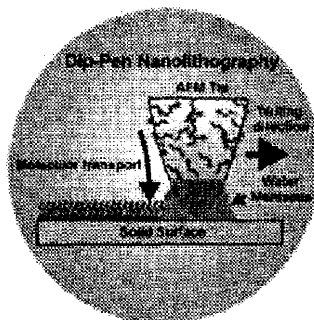
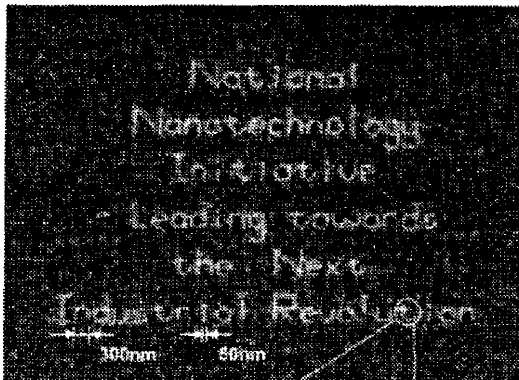
www.jenck.comishim-spm9500-t.btm JENCK-SHIMAZDU

Mediante técnicas de detección y análisis de moléculas individuales (SMD, del inglés "singlemolecule detection") se permite la visualización y manipulación de moléculas aisladas sin dañarlas. Haces de luz láser pueden ser empleados como auténticas pinzas ópticas que permiten atrapar y manipular biomoléculas individuales con gran precisión. Manipulando la fuerza que se aplica a estas pinzas ópticas se obtiene una respuesta similar a los cambios en el estado de compresión de un muelle regidos por la ley de Hook. Se pueden registrar desplazamientos con una precisión por debajo del nanómetro, que corresponde con una precisión en la medida de la fuerza aplicada por debajo del piconewton. De esta forma, ya es posible analizar el funcionamiento de motores moleculares individuales.

En cuanto a los *puntos cuánticos*, www.icesi.edu.co/conexion/ediciones/06/nanotecnologia.htm son pequeñísimos cristales que contienen unos pocos centenares de átomos donde los electrones se encuentran confinados en niveles de energía muy separados y que emiten radiación de longitud de onda única al ser excitados. Ello hace que estos puntos cuánticos se empleen como marcadores en estudios de biología.

El *corral cuántico* consiste en, por ejemplo cuarenta y ocho átomos de hierro formando un ovalo dispuestos sobre una superficie de otro metal, en este caso cobre. Dentro de ese corral ocurren efectos sorprendentes cuando los electrones del metal quedan atrapados dentro del mismo. El más sorprendente es que se produce la aparición de un electrón "fantasma" dentro del corral. Este efecto se denomina "Espejismo Cuántico" y podría indicar que se puede transmitir corriente eléctrica sin necesidad de cables en dispositivos muy pequeños.

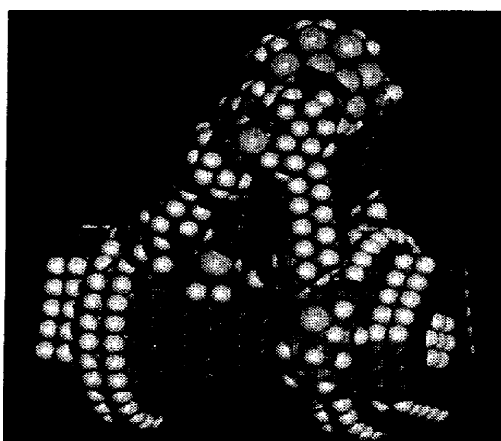
Un brazo ensamblador molecular de uso general debe ser capaz de mover su "mano" a través de una serie de diámetros atómicos, posicionándola con la precisión que dicha escala requiere y entonces ejecutar movimientos finamente controlados para transferir unos pocos átomos en una reacción química guiada. Nuestros brazos usan grandes músculos y articulaciones para realizar movimientos a escala macroscópica pero a través de los dedos ejecutan movimientos más sutiles para trabajos de precisión. Es lo mismo aplicado a los ensambladores moleculares.



Credit: S. Hong and C.A. Mirkin, Northwestern University Center for Nanofabrication and Molecular Assembly"

web.fcen.uba.ar/prensa/noticias/2002/noticias_20jul_2002.html. Oficina de prensa USA (Universidad de Buenos Aires)

Un controlador de movimiento fino (fine motion controller) para ensamblaje molecular



© Institute of Molecular Manufacturing www.imm.org

La ilustración muestra una estructura resultante de una larga secuencia de diseños y re-diseños llevados a cabo en el *Institute for Molecular Manufacturing* con el propósito de especificar la estructura atómica de un controlador de movimiento fino a escala molecular. Su núcleo consiste en un fuste que une dos platos hexagonales finales encerrando un conjunto de ocho anillos. Cada anillo será rotado

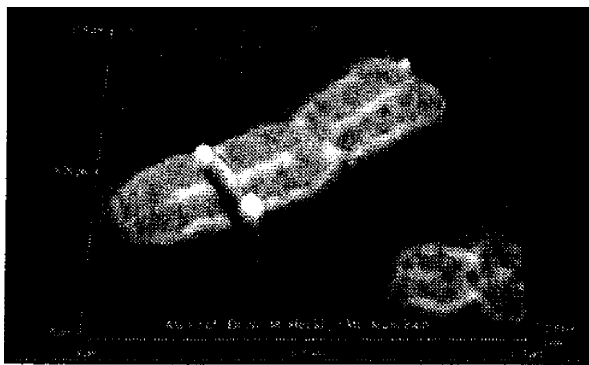
mediante una palanca conducida por un mecanismo de levas y soporta un puntal unido a una plataforma central. Girando un anillo mueves un puntal, que a su vez mueve a la plataforma; posicionando los ocho anillos se determina una posición de la misma en el eje x, y ó z.

El principal problema de diseño es facilitar un rango adecuado de movimiento sin interferencia mecánica o tensiones de enlace y sin las limitaciones impuestas por el tamaño de las herramientas de modelado. La estructura que se muestra arriba puede ejecutar movimientos precisos sobre diámetros atómicos con una rotación de 90 grados y contiene casi 3000 átomos.

2. HERRAMIENTAS MOLECULARES PARA BIOLOGÍA Y MEDICINA.

Aparte del desarrollo de máquinas mucho más pequeñas que una bacteria o una célula humana, resulta fascinante pensar en el potencial que como "nanorecursos" ofrecen elementos del mundo biológico -por ejemplo, trocitos de ADN para procesadores de ordenadores-. Según información recogida de diariomedico.com (Enero 2002), la Universidad de Comen, en Estados Unidos, ha sido uno de los centros neurálgicos de la investigación nanotecnológica. Harold Craighead, director del Cornell Nanotechnology Center, anunció en el primer semestre de 2001 un avance en el campo de la investigación genética: el uso de nanodispositivos para desarrollar recursos de silicón de tamaño molecular que interactuasen con las partículas de ADN. Investigadores de la Universidad de California ya han logrado un diminuto *chip biónico* al integrar una célula viva en un circuito electrónico. Todavía está en fase experimental, pero algún día podría implantarse en el cuerpo humano para liberar fármacos o detectar el inicio de tumores (30-10-2002, diario ABC).

Carlo Montemagno y su equipo de investigación de la Universidad de Cornell han logrado diseñar pequeños motores del tamaño de un virus partiendo de elementos biológicos y mecánicos. Aún es prematuro, pero dentro de no mucho tiempo podríamos beneficiarnos del uso de estos motores en el interior de una célula humana, interviniendo, por ejemplo, en el metabolismo de las proteínas.

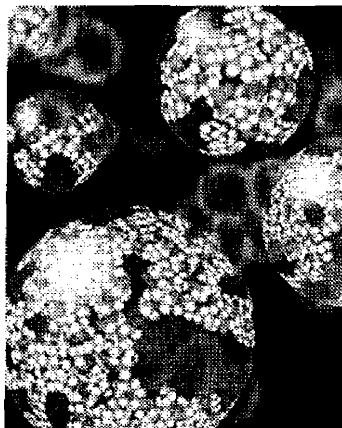


Y ya existen algunos modelos para inspirarse (Quasar, El Planeta), El científico David Blair, en la Universidad de Utah, estudia el comportamiento del Flagelum, un filamento que impulsa a las bacterias, y que en la práctica es un *nanomotor*, que desarrolla 15.000 revoluciones por minuto. Además un investigador llamado Don Eigler utilizó un microscopio electrónico del tipo *scanning-tunneling*, STM, para mover átomos de xenón y escribir las siglas IBM.

Y ese sería el primer paso, pues las proteínas son frágiles ya que "incluso se las puede cocinar", dice Drexler (Foresight Institute). Sky Coyote, analista de Intergalactic Reality es contundente: "las máquinas bioquímicas son tontas... además las afectan el calor, la luz, la oscuridad, el ph, el agua, entre muchos otros materiales y factores... el hecho de que hayan tardado dos mil millones de años en evolucionar no significa que sean mejores, simplemente supieron sobrevivir".

Pero Drexler no se desanima. "Utilizaremos maquinaria hecha con proteínas para construir nanomáquinas más resistentes".

Estos (pequeños) robots tendrán funciones esenciales. La primera será actuar como ensambladores, de la misma forma que opera el trabajador de una fábrica, pero construyendo moléculas. La segunda será la capacidad de replicarse a velocidades vertiginosas, lo que permitirá contar con resultados a gran escala.



Los nanorecursos se utilizan para reparar o ampliar moléculas como las dendritas. Novartis.

"Necesitamos aplicar a una escala molecular el mismo concepto que ya demostró su efectividad en el mundo macroscópico: hacer que las partes sean colocadas donde queremos que vayan, poniéndolas nosotros mismos", argumentó Ralph Merkle, amigo de Drexler y colaborador suyo en el proyecto del brazo mecánico molecular. Uno de los problemas para avanzar en este campo, dice Drexler, es que los bioquímicos siguen actuando como científicos y no como ingenieros. Investigan la forma en que las proteínas se comportan, pero no las fórmulas para que ese comportamiento sea *predecible o manipulable*.

En el capítulo 7 de "Engine of Creation" (Los Motores de la Creación), Drexler habla de realidades que son resultado de utilizar herramientas moleculares. Allí afirma que algunas compañías farmacéuticas como *Upjohn*, han sintetizado moléculas modificadas de *vasopresina*, una hormona que consiste en una cadena corta de aminoácidos. La vasopresina incrementa el trabajo realizado por el corazón y disminuye el ritmo al cual los riñones producen orina; esto aumenta la presión sanguínea. Los investigadores diseñaron moléculas de vasopresina modificada que afectaban a los receptores de vasopresina natural presentes en las células del riñón más que a los del corazón, dándole a aquellos un efecto medicinal más específico y controlable. Más recientemente, diseñaron una molécula de vasopresina modificada que se adhiere al receptor molecular del riñón sin producir ningún efecto directo, bloqueando de este modo al receptor e inhibiendo la acción de la vasopresina natural.

Pese a todo, aun queda mucho por recorrer en este mini universo, y existen factores incuestionables que distorsionarían claramente las acciones de los nanorobots: nos referimos a la influencia del principio de incertidumbre de Heisenberg y sus efectos sobre la física cuántica, el calor desplegado por las vibraciones moleculares, las radiaciones ambientales...

Entretanto, la búsqueda prosigue. El Foresight Institute dirigido por Drexler se ocupa de estimularla. Cada año se entregan premios, de 5 ó 10 mil dólares más el anhelado reconocimiento científico, para los investigadores que se hayan acercado más a develar los misterios de la nanotecnología.

Y hay un "Gran Premio Feynman", en honor al Premio Nóbel que hace casi 40 años sugirió la posibilidad de ensamblar átomos. Son 250 mil dólares, que tal vez sean sólo una pequeña parte de la recompensa para quien los gane.

El galardón no tiene fecha de entrega, y va a ser otorgado al primer científico que haga funcionar un nanorobot. Será, sin duda, un día muy especial.

3. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y ECONÓMICO

"Algunos escenarios en los que la nanotecnología puede encontrar aplicaciones, incluyen impactos potenciales positivos y negativos sobre el medioambiente y la sociedad", señala en un informe Ineke Malsch, investigador participante del Institute for Prospective Technological Studies en el proyecto de nanotecnología. El autor admite que se podrían desarrollar fármacos inteligentes para dirigirlos a un determinado órgano o célula. Además, precisa que "la última tendencia es mejorar la conexión entre la biología estructural (es decir, el ADN) y el control de la materia a nivel molecular, incluyendo tanto beneficios potenciales como cuestiones éticas". Sin embargo, considera "más futurista" la idea de nanomáquinas programables muy pequeñas que podrían limpiar vertederos de residuos o las arterias humanas

Estos cambios tendrán un profundo impacto económico. Los chips actuales se producen en plantas que cuestan miles de millones de dólares y que utilizan ondas de luz para grabar capas sucesivas de circuitos en un sustrato de silicio. Los nuevos chips moleculares, en cambio, se podrán fabricar usando simples reacciones químicas que conecten un elevado número de componentes de tamaño molecular por un coste ínfimo.

Los investigadores consideran que a medio plazo, estos avances provocarán lo que los economistas definen como una *tecnología disruptiva*, aquella que altera los presupuestos industriales básicos, como hizo el transistor cuando sustituyó la válvula electrónica en los años cincuenta y los circuitos integrados cuando superaron los transistores individuales en los sesenta.

Pero poco a poco está cambiando la cosa. Y la nanotecnología está convirtiéndose en una promesa económica, un carro al que empiezan a subirse gobiernos, inversores de capital riesgo, grandes empresas orientadas a lo tecnológico y científicos. Se quiere poner también la D del r+D. Y se acerca el momento de que la nanotecnología sea una realidad palpable y cotidiana.

Así las cosas, en los tres últimos años se ha multiplicado la financiación disponible. Desde enero de 2000, los gobiernos han dedicado más de 2.200 millones de euros (365.000 millones de pesetas) a financiar investigación.

En 2002, sólo el Gobierno de los Estados Unidos ha aprobado dedicar ya 465 millones de euros (77.000 millones de pesetas) y quiere aprobar 110 más (18.000 millones de pesetas). Japón invertirá cifras similares, y la Unión Europea ha asignado 1.300 millones de euros (216.000 millones de pesetas) para uno de sus programas marco entre los años 2002 y 2006.

Aún parece poco dinero. Pero el crecimiento será exponencial. Según la National Science Foundation (NSF) norteamericana, el mercado total para productos y servicios de nanotecnología será, en el año 2015, de 1,1 billones de euros (más de 180 billones de pesetas).

Y lo más importante, no son sólo los gobiernos quienes se muestran interesados. Las empresas de capital riesgo empiezan a posicionarse. Y grandes compañías como IBM, Motorola, HP, Lucent, Hitachi, Mitsubishi, NEC, Corning, Dow Chemical o 3M, han lanzado ya iniciativas significativas en el terreno de la nanotecnología.

En España mientras tanto, los científicos hablan de nanopresupuestos. Pero el interés crece y, por ejemplo, en apenas un mes ha habido un par de congresos sobre el tema: en Sevilla, en la Fundación San Telmo, sobre oportunidades de inversión, y en Madrid, con una reunión entre responsables de centros de nanotecnología de Francia, Alemania y Reino Unido en la Universidad Autónoma.

Debido a sus notables implicaciones en términos de ventaja tecnológica y oportunidad de mercado, la nanotecnología está atrayendo grandes inversiones en todo el mundo. A lo largo del año fiscal 2002, EE UU ha movilizado más de 600 millones de dólares (unos 656 millones de euros) de los fondos públicos, una cantidad que se prevé que ascenderá en 2003 hasta 710 millones de dólares (776 millones de euros). La nanotecnología también se está convirtiendo en uno de los principales objetivos para las empresas de capital riesgo en Europa y EE UU.

Esta tendencia muestra un especial dinamismo en Europa, donde un reciente estudio ha identificado 86 redes interfronterizas relacionadas con la nanotecnología en las que participan unas 2.000 organizaciones. El capital invertido alcanza los 200 millones de euros en fondos públicos y se calcula que en el sector privado asciende a unos 100 millones de euros, lo que constituye una inversión en nanotecnologías de casi 1.500 millones de euros durante los próximos cinco años en Europa. El instrumento clave del Espacio de Investigación Europeo, el nuevo Programa Marco de Investigación, asignará a las nanotecnologías el triple de fondos públicos que en la actualidad. Sitio web de la UE para la nanotecnología y centro de prensa-en Internet del congreso sobre nanotecnología:

- <http://europa.eu.int/commiresearchigrowthigcc/pressroom.html>
- <http://www.cordis.lu/nanotechnology>

Según Josh Wolfe, socio gerente de Lux Capital, en casi el 70 por ciento de los nuevos planes comerciales que ve figura la palabra "nano" en el título.

Se está dibujando un paisaje que no tiene más límite que el de la imaginación. Sí los gobiernos asimilan esta nueva proyección de la ciencia con el grado de rigor y sensibilización adecuados, es de suponer que la nanotecnología contribuirá al acercamiento de la sociedad hacia una mayor calidad de vida.