



Una revolución

Amador Menéndez Velázquez

en miniatura

Nanotecnología al servicio de la humanidad

Una revolución en miniatura

Nanotecnología al servicio de la humanidad

Amador Menéndez Velázquez

PREMIO EUROPEO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA
ESTUDI GENERAL 2009

PUV PUBLICACIONS
UNIVERSITAT
DE VALÈNCIA



Director de la colección:
Fernando Sapiña

Coordinación:
Soledad Rubio

Esta publicación no puede ser reproducida, ni total ni parcialmente, ni registrada en, o transmitida por, un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, ya sea fotomecánico, fotoquímico, electrónico, por fotocopia o por cualquier otro, sin el permiso previo de la editorial.

© Del texto: Amador Menéndez Velázquez, 2010

© De la presente edición:

Càtedra de Divulgació de la Ciència, 2010

www.valencia.edu/cdciencia

cdciencia@uv.es

Publicacions de la Universitat de València, 2010

www.uv.es/publicacions

publicacions@uv.es

Producción editorial: Maite Simón

Diseño del interior y maquetación: Inmaculada Mesa

Corrección: Pau Viciano

Cubierta:

Imagen: © Chris Ewels (www.ewels.info)

Diseño original: Enric Solbes

Grafismo: Celso Hernández de la Figuera

ISBN: 978-84-370-7840-3

Depósito legal: SE-7131-2010

Impresión: Publidisa

*A las personas más grandes y generosas
que he conocido, mis padres*

Premios Literarios Ciutat d'Alzira 2009

Esta obra obtuvo el XV Premio Europeo de Divulgación Científica Estudio General, instituido por la Universitat de València y el Ayuntamiento de Alzira y con el apoyo de Bancaixa. Formaban parte del jurado Carlos Correal, Esteban Morcillo, Carolina Moreno, Jesús Purroy y Fernando Sapiña.

A los locos. A los inadaptados.
Los rebeldes. Los que causan problemas.
Los círculos en los agujeros cuadrados.
Aquellos que ven las cosas diferentes.
Ellos no son aficionados de las reglas y no tienen respeto por el *statu quo*.
Puedes citarlos, estar en desacuerdo con ellos, glorificarlos o difamarlos.
Pero la única cosa que no puedes hacer con ellos es ignorarlos.
Porque ellos cambian las cosas.
Ellos empujan a la humanidad hacia adelante.
Y mientras que algunos pueden verlos como los locos, nosotros vemos genios.
Porque las personas que están lo suficientemente locas para pensar que pueden
cambiar el mundo, son las que lo logran.

APPLE COMPUTER

ÍNDICE

PRÓLOGO	11
Capítulo 0. LAS REVOLUCIONES CIENTÍFICO-TECNOLÓGICAS .	15
EL PROGRESO CIENTÍFICO	17
Capítulo 1. HACIA EL NANOMUNDO	21
NANO Y NATURALEZA	24
NANO: EL PRINCIPIO	26
UN DISCURSO MÍTICO	28
VISIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA	30
MIRANDO HACIA EL NANOMUNDO: CRUZANDO LA BARRERA DE LO INVISIBLE	34
ARQUITECTURA EN LA NANOESCALA: CRUZANDO LA BARRERA DE LO MANIPULABLE	41
LAS CONSECUENCIAS DE PENSAR EN PEQUEÑO	44
Capítulo 2. NANOMATERIALES: NUEVAS PROPIEDADES	
A MENORES DIMENSIONES	47
MATERIALES: HUELLAS DEL HOMBRE EN LA HISTORIA	47
NANOMATERIALES Y SU CLASIFICACIÓN	48
NANOMATERIALES CERO-DIMENSIONALES	51
NANOMATERIALES MONODIMENSIONALES	59
NANOMATERIALES BIDIMENSIONALES	61
Capítulo 3. BIOMIMÉTICA: LECCIONES DE LA NATURALEZA...	65
EL PIE DEL GECKO	67
EL OJO DE LA ESTRELLA DE MAR: LA RED ÓPTICA DE LA ESPONJA.	71
EL ABULÓN	73
DIATOMEAS, PRECURSORES DE LOS CHIPS DE SILICIO	75
NANOTUBOS NATURALES	79

Capítulo 4. NANOMEDICINA: BIONANOTECNOLOGÍA	
EN BENEFICIO DE LA SALUD HUMANA	81
LA ENFERMEDAD: UN LEGADO HISTÓRICO.....	82
REMEDIOS PARA DIFERENTES ÉPOCAS	82
DEL NANODIAGNÓSTICO A LA NANOTERAPIA.....	85
NANOTERAPIA: LIBERACIÓN INTELIGENTE DE FÁRMACOS.....	88
ÓRGANOS Y TEJIDOS ARTIFICIALES.....	98
Capítulo 5. HACIA EL HOMBRE BIÓNICO	105
IMPLANTES COCLEARES	107
LA RETINA ARTIFICIAL	109
INTERFACES DE MÁQUINAS CEREBRALES.....	113
OTROS FASCINANTES DESAFÍOS	118
Capítulo 6. LA ERA DE LA INFORMACIÓN: UNA REVOLUCIÓN	
ESCRITA CON LUZ Y SILICIO	121
DEL ELECTRÓN A LA MICROELECTRÓNICA	121
LA APARICIÓN DE GORDON MOORE	125
UNA AGUJA VERTICAL EN UN CAMPO DE FÚTBOL	127
LOS PRIMEROS LÍMITES A LA MINIATURIZACIÓN	129
EL CABLEADO	131
DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	132
NUEVOS RETOS PARA EL ORDENADOR DEL FUTURO.....	134
EL VIAJE DE LA INFORMACIÓN.....	136
DE LA MICROELECTRÓNICA A LA MICROMECAÍNICA	138
Capítulo 7. COMPUTACIÓN QUÍMICA: DE LA BACTERIA	
AL CEREBRO	141
PRINCIPIOS DE LA COMPUTACIÓN QUÍMICA	142
LA VIDA SOCIAL DE LAS CÉLULAS	144
¿POR QUÉ LOS ANIMALES NECESITAN DESARROLLAR UN MECANISMO	
DE SEÑALIZACIÓN DE RANGO MÁS PROLONGADO	146
NUESTROS «DISCOS DUROS».....	147
ANALOGÍAS ENTRE NUESTRO CEREBRO Y LOS ORDENADORES.....	149
BIOLOGÍA MOLECULAR DEL DOLOR	150
EPÍLOGO	155
BIBLIOGRAFÍA.....	163
ÍNDICE ANALÍTICO	165

PRÓLOGO

El ojo ve, es una operación vital a la que está obligado como órgano de los sentidos. La mente inquieta se asoma y no sólo ve, también mira, observa, examina hasta el más minúsculo detalle y, a veces, descubre. Así es la ciencia. Proyectada a una vertiente aplicada se convierte en tecnología. Un gran invento es una idea genial, un inicio pequeñito con un imprevisible gran producto final. ¡Es la consecuencia de una sabia mirada!

Es frecuente oír hablar de aventura espacial o del descubrimiento de nuevos planetas extrasolares. Sin embargo, una de las más grandes contribuciones que están gestando la ciencia y la tecnología tiene como escenario un universo mucho más pequeño y permanece en cierto modo oculta. Es «invisible» en un doble sentido del término: ausente en gran medida de la literatura no especializada —y, por lo tanto, del gran público—, y también invisible en el más literal de los sentidos, ya que sus protagonistas, los átomos, son tan pequeños que escapan al ojo humano e incluso a los más potentes microscopios ópticos, pero no a las miradas curiosas.

¿Por qué no creer en lo pequeño? Lo decía el escritor español Baltasar Gracián: «Lo bueno, si breve, dos veces bueno». Lo reiteraba el novelista y dramaturgo francés Alejandro Dumas: «Todo cabe en lo breve. Pequeño es el niño y encierra al hombre; estrecho es el cerebro y cobija el pensamiento; no es el ojo más que un punto y abarca leguas». Estamos ante la inmensidad de lo mínimo.

Antes de que un terremoto en el año 227 a. de C. lo destruyera, el Coloso de Rodas, una estatua de bronce con la efigie del dios Helios, se hallaba a la entrada del puerto de Rodas y se elevaba 32 metros por encima de las olas. Se le consideraba una de las siete maravillas del mundo construidas por la humanidad. En tiempos recientes, nuestra versión de lo maravilloso se ha encogido –de lo muy, muy grande, a lo muy, muy pequeño– de la idea de *colossus* (que en griego significa enorme) a la idea de *nano* (lo diminuto, lo enano, lo infinitamente pequeño). La nanotecnología –la ingeniería a escala atómica– nos permite fabricar materiales y dispositivos a partir del reordenamiento de átomos y moléculas. Manipular la materia a este nivel nos abre un enorme abanico de pequeñas soluciones a grandes problemas de la humanidad, como los relativos a la salud humana y desarrollo sostenible de nuestro planeta. Al mismo tiempo, nos permite afrontar nuevos y fascinantes retos y desafíos tecnológicos, en campos tales como el sector aeroespacial o las nuevas tecnologías de la información y la comunicación.

Se dice que la nanotecnología traerá consigo una nueva revolución industrial. La primera revolución industrial transformó nuestras vidas. A nivel individual, dobló la esperanza de vida media; a nivel de estado, hizo posibles civilizaciones verdaderamente globales. ¿Serán posibles cambios similares con la nanotecnología? La nanotecnología ya tiene fascinantes productos en el mercado, aunque bien es cierto que otros todavía están en un estado latente, bien sea en los laboratorios o en las pantallas de ordenador de los científicos teóricos. ¡Lo mejor está aún por llegar!

Vivimos en una sociedad científico-tecnológica. Intente imaginar el mundo sin sus grandes avances tecnológicos: antibióticos, automóviles, aviación, radio, televisión, luces eléctricas, ordenadores, Internet... A buen seguro que también habría vida,

pero de una forma muy diferente a como hoy la conocemos. La historia de la tecnología es la historia de las necesidades e inquietudes humanas, al amparo de las posibilidades fijadas por las leyes físicas. La nanotecnología jugará un papel fundamental en los próximos cambios tecnológicos.

Nano viene del griego. El nanómetro es la milmillonésima parte del metro, ($1 \text{ nm} = 0,000000001 \text{ m}$). Son bien conocidos los principios científicos que determinan el comportamiento de átomos y moléculas individuales, cuyo dominio empieza en la décima parte del nanómetro, unidad conocida como Angstrom (\AA). Asimismo, sabemos muy bien como se comporta la materia a escala microscópica y macroscópica, es decir, el comportamiento resultante de la agrupación de un número de Avogadro de átomos y moléculas. Queda aún una escala intermedia, un universo en miniatura por explorar: el nanocosmos. Esa escala representa el primer nivel de organización de átomos y moléculas, de cuya unión resultan nanocristales, nanotubos, nanobiomotores, nanomáquinas biológicas, etc.

La nanociencia y la nanotecnología no sólo representan una gran oportunidad de inversión para los empresarios. Más importante aún, permiten la unificación y convergencia de la mayoría de las ramas de la ciencia y la tecnología en la escala del nanómetro. El nanomundo representa el umbral natural donde todos los sistemas vivos y artificiales trabajan. ¡Quizás ahí radique otra de sus grandezas! Si está leyendo este libro es gracias a la acción de 10.000 bionanomáquinas, que cooperan coordinadamente para hacerlo posible.

Átomo, gen, bit y neurona son los pilares básicos sobre los que emergen las disciplinas nanotecnología, biotecnología, ciencias de la información y ciencias cognitivas, respectivamente. Hoy se habla de convergencia NBIC (Nano-Bio-Info-Cogno) en la escala del nanómetro. También se habla de

sinergismo. El progreso en cualquiera de estas disciplinas viene condicionado por los avances en las demás. ¡Estamos ante una gran revolución en el edificio conceptual de la ciencia!

Si tomamos un material inerte, una célula, un chip de ordenador o una neurona y efectuamos un «zoom» hasta llegar al nanómetro, allí nos encontraremos con los mismos bloques básicos: átomos y moléculas. Así, por ejemplo, las propiedades macroscópicas de este papel que tiene en sus manos son una consecuencia directa de su estructura a nivel *nanométrico*. Es también en esa escala donde las estructuras fundamentales de la *vida* se presentan dentro de las células biológicas, incluyendo la molécula de ADN. Muy pronto los componentes electrónicos elementales, que son la base de la *tecnología de información*, tendrán dimensiones de unos pocos nanómetros. Entender el funcionamiento del cerebro humano requiere la investigación sobre fenómenos a escala nanométrica, como los que tienen lugar en los receptores ubicados en las *neuronas*.

Los desafíos científicos en la escala del nanómetro son tan inmensos como las oportunidades tecnológicas. El objetivo de este libro es acercar a los lectores este universo en miniatura y sus enormes posibilidades tecnológicas, pero presentando la tecnología no sólo como una mera colección de aparatos, sino como una parte esencial de la estructura de nuestro mundo. ¡Bienvenido al nanomundo!

Capítulo 0
LAS REVOLUCIONES
CIENTÍFICO-TECNOLÓGICAS

Quizás sea difícil aceptar que los cambios y avances tecnológicos remodelan y trazan nuestro mundo y formas de vida, pero un contexto histórico puede ayudarnos a visualizar y asumir esta realidad. Por otra parte, el ritmo del cambio tecnológico se está acelerando. En las próximas décadas, se pueden producir más cambios tecnológicos que en todo el siglo pasado. Las lecciones de las anteriores revoluciones tecnológicas son nuestra mejor guía cuando nos enfrentamos a la siguiente. Por eso hemos querido articular este capítulo cero, en un intento de concienciar al lector del impacto de la ciencia y la tecnología en nuestra sociedad.

La primera mitad del siglo XX fue testigo de una explosión tecnológica que alteró sustancialmente la forma en que vivimos. En 1900 se consideraba imposible la existencia de máquinas voladoras más pesadas que el aire; para nuestra sorpresa, en 1950 los aviones ya se aproximaban a la velocidad del sonido. En 1900, las personas no tenían coches, electricidad o agua corriente; en 1950, los tuvieron a su alcance. Los mismos cincuenta años vieron una parte esencial del desarrollo de los antibióticos, la radio, la televisión, los plásticos, las armas nucleares y los equipos mecanizados. Tractores, cosechadoras y equipos similares redujeron en un factor de diez el número de

personas necesarias para producir una determinada cantidad de alimentos.

En gran medida, la marcha del progreso continuó a través de la segunda mitad del siglo. Los aviones de pasajeros se convirtieron en algo común y, con el Boeing 747, el transporte aéreo se hizo rentable para algunos tipos de mercancías. La red mundial de comunicaciones forjó una economía mundial. Televisores, ordenadores, teléfonos celulares y aparatos similares pasaron a formar parte de nuestras vidas cotidianas. Se lograron algunas proezas históricas, como ese 21 de julio de 1969 en el que el hombre pisó la Luna.

Si en 1900 le hubiese dicho a un agricultor que algunos de sus descendientes en un siglo se pasarían la mayoría del tiempo en edificios con calefacción y aire acondicionado, sentados delante de un ordenador, hablando, leyendo y escribiendo, lo podría haber creído si fuera un creyente en el progreso. Si le hubiera dicho que eso se llamaría «trabajo», probablemente se habría reído en su cara. Los triunfos de la tecnología del siglo XX —el estómago lleno y el hecho de no tener que hacer trabajo físico— son una realidad, aunque hayan acarreado otros problemas.

Y si el progreso no va aún más rápido es porque hay un fenómeno real de los rendimientos decrecientes. Una máquina de afeitar con dos láminas no es dos veces tan útil como una con una sola hoja. Los coches alcanzaron un límite de velocidad y, por lo tanto, un límite de utilidad, debido a las limitaciones de los reflejos humanos y no a las limitaciones de la capacidad mecánica. Asimismo, los aviones de pasajeros alcanzaron un límite de velocidad como resultado de los regímenes económicos y de optimización del vuelo. La tecnología para el vuelo supersónico de pasajeros está preparada, sólo que cuesta demasiado.

EL PROGRESO CIENTÍFICO

En la primera mitad del siglo XX se produjo un gran impulso de la química y la física, revolucionando la forma de entender el comportamiento de la materia ordinaria con la mecánica cuántica. En 1950 un científico podía dar una explicación racional de propiedades de los materiales, basándose en las minúsculas partes que los constituyen. El científico de 1900 a lo más que podría haber llegado es a un conjunto de observaciones empíricas.

Avanzamos rápidamente hasta 1825. Los químicos siguen descubriendo nuevos elementos, dividiéndolos en dos clases –inorgánicos y orgánicos– que nunca confluían. Los compuestos orgánicos forman parte de los seres vivos, mientras que los inorgánicos los pueden crear los químicos en tubos de ensayo. Se pueden descomponer los compuestos orgánicos, por supuesto, basta con quemarlos. Pero ponerlos juntos, se pensaba, requeriría una fuerza de vida inefable. Entonces en 1825 un joven profesor de química, Friedrich Wöhler, produjo un sólido inerte de una mezcla acuosa de cianuro de hidrógeno y amoníaco. En 1828 se había logrado demostrar que el compuesto era químicamente idéntico a la urea, un compuesto orgánico que se encuentra en la orina.

La química ha sido una gran fuerza impulsora, haciendo posibles grandes cambios en los siglos XIX y XX. La elevada producción de amoníaco, ácido sulfúrico, cemento, hierro, aluminio, drogas, fibras, tintes, polímeros, plásticos, productos derivados del petróleo, etc. ha cambiado el mundo. La química impulsó varias economías. En el año 1947, en pleno apogeo de la química, se descubrió el transistor, la base de la moderna electrónica y computación. Más tarde vino el circuito integrado,

que revolucionó más estos sectores e hizo posible una verdadera electrónica de consumo. Nacía así la era de la física.

A pesar de estos avances, seguíamos sin entender el maravilloso fenómeno de la vida. En 1944, sin embargo, las cosas habían avanzado hasta el punto de que Erwin Schrödinger escribió *¿Qué es la vida?* Este ensayo histórico presentaba un argumento convincente de que una serie de fenómenos a nivel celular podrían ser parte de una cadena ininterrumpida de la explicación, confluyendo finalmente en la mecánica cuántica (de la que el propio Schrödinger fue uno de los principales impulsores). Nueve años más tarde, Francis Crick, James Watson y Maurice Wilkins descubrieron la estructura del ADN, basándose en medidas de difracción de rayos X de Rosalind Franklin. Las puertas a la comprensión de la vida se abrieron por completo.

Cuando estudiaba en el colegio, recuerdo que mi profesor de biología explicaba las cuatro propiedades que hacen que los seres vivos seamos diferentes de los seres inanimados. Éstas eran organización, metabolismo, reproducción e irritabilidad. Organización significa que los organismos tienen una estructura interna compleja, que se compone de células, y a su vez estas células tienen su propia estructura interna. Metabolismo hace referencia al consumo de alimentos para el crecimiento y la actividad. Reproducción es un proceso biológico que permite crear nuevas criaturas. Y la irritabilidad se refiere a la reacción de un individuo ante los estímulos negativos, que va desde la acción consciente de los seres humanos a los tropismos de las plantas.

Lo que no nos explicaba, en parte porque era sólo un curso introductorio, era cómo todas las propiedades son el resultado de la actividad de las máquinas moleculares. La vida es un fenómeno molecular, un fenómeno en la nanoescala. Y algunas complejas nanomáquinas, como los ribosomas, son capaces de crear nuevas nanomáquinas. Desde aquel 1953 hemos progre-

sado mucho en la respuesta a ese interrogante eterno sobre la vida. ¡Hoy sabemos qué somos, al menos desde el punto de vista biológico!

De igual manera que hubo una era de la física, de la química... muchos predicen que la próxima era será la de la biología y los materiales. Pero en dicha era es muy probable que sean los puntos de contacto entre las disciplinas, antes que las disciplinas en sí mismas, lo que más contribuya al desarrollo. Estamos ante una convergencia científico-tecnológica como motor de impulso. ¡Y esa convergencia se produce en la nanoescala!

Una revolución en miniatura

La historia de la tecnología es el reflejo vivo de las necesidades y las inquietudes humanas, al amparo de los límites fijados por las leyes físicas. En los albores de este nuevo milenio, estamos asistiendo al impulso de la más revolucionaria de las tecnologías, la que basa su potencial en la manipulación de la materia a escala atómica y molecular. *Una revolución en miniatura*, XV Premio Europeo de Divulgación Científica Estudi General, examina el papel determinante de la nanotecnología a la hora de afrontar algunos de los más grandes problemas de la humanidad, así como fascinantes retos y desafíos tecnológicos.

«Una inteligente, rigurosa y visionaria mirada a la nanotecnología, más allá de los horizontes convencionales, que entrelaza magistralmente diferentes disciplinas científicas».

Harold W. Kroto

Premio Nobel de Química 1996

«Ejemplo de excelencia en la comunicación científica. Su lenguaje claro y entusiasta y su amplitud de miras son capaces de seducir a un público general y a una audiencia especializada. Explica magistralmente el *gran reto de lo pequeño*: la nanotecnología».

Pedro Miguel Echenique Landiribar

Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 1998

«Un fascinante y cautivador libro sobre nanotecnología. Amador ha conseguido que la tecnología de lo pequeño resulte fácilmente comprensible y despierte inquietudes».

Robert Langer

Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica 2008
y *Premio Tecnología del Milenio 2008*

