

José Ángel Martín-Gago,
Carlos Briones, Elena Casero
y Pedro A. Serena



El nanomundo en tus manos

Las claves de la nanociencia y la nanotecnología



Uno de los campos más apasionantes de la ciencia y tecnología actuales es el de «domesticar» el mundo de lo más pequeño (átomos y moléculas), para construir con estos «ladrillos» nuevos dispositivos o instrumentos. Tal es el objeto de la llamada nanociencia y nanotecnología, dos pujantes disciplinas hermanas llamadas a perfilar, y revolucionar, el panorama tecnológico en este siglo. Nadie duda ya, en efecto, que la nanotecnología constituye una potentísima herramienta capaz de volver a transformar la sociedad como ya lo hizo la microelectrónica en la primera mitad del siglo xx; su potencialidad en todas las áreas del conocimiento parece ilimitada, tanto que a veces nos surge la duda de si algunos de los logros que promete se convertirán en realidad o serán mera ciencia ficción. De hecho, uno de los objetivos de este libro es poner en las manos de los lectores información actual y objetiva para que pueda evaluar las consecuencias sociales y éticas de unas tecnologías que pronto estarán en sus hogares. «El nanomundo en tus manos» ayuda, por una parte, a visualizar el significado de la palabra «nano»; es decir, nos introduce de lleno en los procesos que tienen lugar cuando los tamaños o distancias típicas son de un nanómetro (mil millonésima parte de un metro), de manera que podamos entender, sin recurrir a una formulación rigurosa y ayudados por un abundante y cuidadosamente seleccionado conjunto de ilustraciones, cómo es el mundo de lo más pequeño, cuáles las leyes que lo gobiernan y los objetos que lo pueblan. Por otra parte, esta obra nos muestra, a través de ejemplos extraídos de los laboratorios más punteros de investigación, cómo nuevas propuestas que emergen desde diversos campos del conocimiento (química, física, materiales, biomedicina...) se van materializando en nuevos dispositivos; es decir, cómo se va pasando de los experimentos de laboratorio a desarrollos tecnológicos que dejan traslucir un mundo nuevo, uno en el que las posibilidades se anuncian infinitas y revolucionarias.



José Ángel Martín-Gago & Carlos Briones & Elena Casero & Pedro
Serena

El nanomundo en tus manos

ePub r1.0

Un_Tal_Lucas 07.01.2017

José Ángel Martín-Gago & Carlos Briones & Elena Casero & Pedro Serena, 2014

Editor digital: Un_Tal_Lucas
ePub base r1.2





PRÓLOGO

Mi primera memoria sobre *nanotecnología* —la tecnología de lo más pequeño— se remonta a una película de los años sesenta: *Un viaje alucinante*, un clásico de la ciencia ficción digno de Julio Verne. En la época en que transcurre la acción, las técnicas de miniaturización han progresado tanto como para reducir el tamaño de los átomos decenas de millones de veces. Este avance permite a un grupo de médicos dentro de un submarino microscópico navegar por las venas de un paciente y llegar hasta su cerebro para eliminar un coágulo de sangre.

Aunque en el mundo real miniaturizar átomos es imposible, gracias a la nanotecnología se pueden ya enviar, si no liliputienses submarinos, sí «sondas» al cerebro o a cualquier otro órgano humano. Dichas sondas son nanopartículas que llegan a los lugares más recónditos del cuerpo para atacar un tumor o diagnosticar una enfermedad. Por ejemplo, nanopartículas fluorescentes o magnéticas previamente funcionalizadas con moléculas biológicas capaces de reconocer tejidos malignos, una vez inyectadas en animales (y en el futuro, en personas) por vía intravenosa, recorren su organismo hasta fijarse en regiones receptoras de dichas moléculas. Un detector externo localiza las partículas y, de este modo, el tumor maligno. Si, además, las nanopartículas son radiactivas pueden actuar como focos de radiación muy próximos al tumor en cuestión, evitando así el daño a los tejidos sanos.

Además de a la medicina, la nanotecnología afecta a muchos otros aspectos de nuestras vidas, desde la manera de comunicarnos a cómo producimos o almacenamos energía, desde lo que fabricamos a lo que consumimos, desde la forma de averiguar lo que nos hace humanos a cómo tratamos el mundo a nuestro alrededor.

Pero ¿qué es la nanotecnología? La aplicación práctica de la nanociencia, o ciencia de los materiales a escala nanométrica, es decir, la ciencia de lo minúsculo. (Un nanómetro, cuya etimología es la misma que la de la palabra *enano*, es la mil millonésima parte de un metro). Para hacernos una idea de esta escala submicroscópica, podemos tener en cuenta que el ancho de un cabello humano es entre cincuenta y cien mil nanómetros, el tamaño de un virus es de diez, y el diámetro de un

átomo es aproximadamente medio nanómetro. El nombre de nanomateriales suele reservarse a aquellos materiales en los que al menos una de sus dimensiones es inferior a los cien nanómetros, una frontera sin duda arbitraria pero a la vez flexible.

Ya en 1959 un físico visionario llamado Richard Feynman proponía, en un ensayo titulado *Aún queda mucho espacio en el fondo*, ingeniosos métodos para reducir miles de veces el tamaño de una máquina o para miniaturizar las letras de un libro, de modo que los 24 tomos de la Enciclopedia Británica cupieran en la cabeza de un alfiler. Anticipándose en varios años a las ideas de *Un viaje alucinante*, Feynman hablaba de un futuro «cirujano mecánico» capaz de navegar por una vena hasta el corazón para reparar una válvula defectuosa.

Para incentivar el desarrollo de sus ideas, Feynman ofreció un premio de mil dólares a la primera persona que escribiera la información que cabe en una cuartilla en una superficie veinticinco mil veces menor, y otro equivalente a quien primero construyera un motor del tamaño de un cubo de menos de diez micras de lado. (La micra, o micrómetro, es la milésima parte de un milímetro. Un nanómetro es, pues, la milésima parte de la micra). El segundo de estos premios lo ganó, al año siguiente, un meticuloso mecánico que construyó ese motor usando herramientas convencionales. El primero no se otorgó hasta 1985, cuando un estudiante de doctorado de la universidad de Stanford escribió el primer párrafo del libro *Historia de dos ciudades* a una escala 25 000 veces menor que el original. Pero, para entonces, la industria de microelectrónica estaba ya en la vanguardia de la miniaturización.

El primer impulsor de la nanotecnología ha sido sin duda la carrera por reducir las dimensiones de los transistores que forman parte de los circuitos integrados, componentes claves de cualquier aparato electrónico actual. En 1970, el tamaño de dichos transistores era de 10 micras; cinco años después era ya diez veces inferior. En el 2002 bajaba de la décima de micra, o sea estaba por debajo de los cien nanómetros, y en la actualidad está en sólo veinte. En este sentido, puede decirse que la electrónica, con sus innumerables manifestaciones en la vida actual, es el ejemplo más claro del éxito de la nanotecnología, término acuñado en 1974 por el profesor Norio Taniguchi, de la Tokyo Science University, para describir la fabricación de materiales con precisión nanométrica y que Eric Drexler incluyó en el título de su libro de 1986 *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. (*La nanotecnología. El surgimiento de las máquinas de creación*, Gedisa, Barcelona, 1993).

En paralelo, el extraordinario avance de la nanociencia ha sido posible por el perfeccionamiento de microscopios capaces de «ver» objetos a escala nanométrica, y la invención de otras nuevas formas de «verlos». Hay una ley de la física que viene a decir que no es posible ver con claridad un objeto más pequeño que la longitud de onda

de la luz que se usa para observarlo. De ahí que el límite de los microscopios ópticos convencionales esté en una micra aproximadamente. Para ver objetos más pequeños es preciso usar luz ultravioleta (de menor longitud de onda que la visible). Por debajo de un cuarto de micra se utiliza el microscopio electrónico, que emplea electrones en vez de luz (fotones) para iluminar un objeto y crear una imagen ampliada. El primer microscopio electrónico de transmisión comercial (1939) tenía una resolución de unos 50 nm, mientras, que hoy en día, los más avanzados producen imágenes con una resolución mejor que una décima de nanómetro.

La invención del microscopio electrónico de efecto túnel (1981), y sus numerosas variaciones posteriores, ha representado otro gran avance para visualizar átomos individualmente, así como sus posiciones relativas en un material. La versatilidad de esta clase de instrumentos, capaces de funcionar tanto en vacío como con líquidos o en atmósferas gaseosas y en un rango muy amplio de temperaturas, los ha hecho herramientas indispensables para la investigación de nanomateriales.

El tercer gran motor de la nanociencia y la nanotecnología ha sido, y sigue siendo, el descubrimiento de materiales con propiedades a veces insospechadas, y el diseño y la creación en el laboratorio de combinaciones de materiales conocidos que muestran características prácticas mucho más favorables que cada uno por separado. Entre los nuevos materiales, sobresalen las diferentes formas geométricas que presenta una capa de carbón con tan sólo un átomo de espesor cuando se organiza en hexágonos ordenados. Unas veces las estructuras son superficies cerradas o semi-cerradas (*fullerenos*), bien en forma de balón de fútbol a escala nanométrica (*buckyballs*) o de nanotubos; otras, la estructura es un sencillo plano asemejando un panel en dos dimensiones.

Este último material, llamado *grafeno*, fue preparado por primera vez en 2004, simplemente exfoliando grafito de alta calidad con cinta adhesiva. La facilidad de su preparación y las extraordinarias propiedades eléctricas, mecánicas y ópticas que mostró el grafeno desde un principio han dado lugar a una moderna «fiebre del oro» (en este caso «fiebre del grafeno»), en busca de fenómenos físicos nuevos o predichos hace años pero nunca observados en el laboratorio y de multitud de aplicaciones comerciales, incluidos circuitos electrónicos, sensores de gases y filtros desalinizadores, pantallas de teléfonos, células solares, y hasta preservativos de mayor elasticidad y seguridad que los actuales. Con razón se ha llegado a llamar al grafeno un material milagroso.

¿Por qué un material con dimensiones nanométricas se comporta de modo diferente a como lo hace cuando su tamaño es macroscópico? Fundamentalmente por tres razones: En primer lugar, por algo que es obvio pero que tiene profundas

consecuencias, sobre todo en medicina: cuanto menor es el tamaño de una partícula más fácil le es acceder a los lugares más pequeños. Otra razón es que, en general, a medida que se reduce el tamaño de un objeto la importancia de su superficie en relación con su volumen aumenta porque, en proporción, el área de la superficie disminuye menos que el volumen. Por tanto, procesos químicos (como catálisis) en que la velocidad de reacción depende de fenómenos que ocurren en la superficie de materiales catalizadores, se favorecen considerablemente cuando un volumen fijo de material se fragmenta en nanopartículas.

La razón más importante, aunque menos intuitiva, es que las propiedades electrónicas de un nanomaterial no se rigen por la mecánica «clásica» que gobierna el comportamiento macroscópico sino por la llamada mecánica cuántica, por la cual el tamaño de un objeto puede afectar drásticamente a sus propiedades más básicas. Por ejemplo, los nanocristales de un material fluorescente emiten luz azul, verde, amarilla, o roja, dependiendo del tamaño (de menor a mayor) de los cristales. Y las partículas de un metal tan inerte y estable como el oro se vuelven muy reactivas cuando su tamaño se reduce a unos pocos nanómetros; su actividad química vuelve a disminuir por debajo de los tres nanómetros.

Aunque entonces no se supiera su origen, ya desde la antigüedad era conocido —y explotado— el peculiar comportamiento de algunos nanomateriales. Los romanos usaban nanopartículas metálicas para colorear vasijas de vidrio, y durante la Edad Media los artesanos las utilizaron en las vidrieras policromas de las catedrales, que todavía causan admiración. Pero ha sido en los últimos cuarenta años, con la confluencia de una explosión de conocimiento científico, el descubrimiento de nuevos materiales y el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación y caracterización, cuando se ha disparado la nanotecnología, convirtiéndose en una fuente de actividad económica cada vez mayor.

En 2012, cuando gobiernos y compañías estaban aún sujetos a estrictas medidas de austeridad como consecuencia de la Gran Recesión del 2008-2010, las inversiones públicas y privadas en nanociencia y nanotecnología aumentaron globalmente un 8% con respecto a las de 2010, superando los dieciocho mil millones de dólares. Por países, la contribución mayor fue la de Estados Unidos, con seis mil millones (36% del total), de los cuales las dos terceras partes procedieron de la industria privada y el resto de los gobiernos federal y estatales.

En la Unión Europea, cuando se suman las inversiones de la Comisión Europea en nanociencia con las de los países individuales, la inversión gubernamental total en 2012 superó los dos mil millones. Esta cifra es casi un 30% menor que en 2010, debido sobre todo a la fuerte reducción de la inversión de los gobiernos de la mayoría de los

países.

Las inversiones de las empresas en investigación y desarrollo en nanotecnología aumentaron sustancialmente en el período 2010-2012, con Estados Unidos a la cabeza, con un aumento del 32%, mientras que en Europa fue tan sólo del 3%. En el mismo período, el retorno de las inversiones de años anteriores aumentó muy considerablemente, con unos ingresos por ventas de productos relacionados con la nanotecnología que crecieron de 340 000 millones de dólares en 2010 a 730 000 millones en 2012. Se espera que en 2014 dichos ingresos alcancen casi 1 400 millones, y que en 2018 pasen de 3000 millones.

No sólo los grandes sectores industriales —materiales y fabricación, electrónica y tecnologías de la información, salud y ciencias de la vida, y energía y medio ambiente— se han beneficiado de una sigilosa revolución tecnológica que no ha hecho más que empezar. En el sector de la construcción, por ejemplo, se usan nanopartículas de sílice para mejorar las propiedades del cemento. Hay pinturas para recubrimientos que contienen nanopartículas para aumentar la resistencia al rayado, la humedad, el moho o las bacterias, y se comercializan tejidos nanoestructurados que repelen manchas y bacterias. Tampoco el material deportivo es ajeno a la nanotecnología: algunas espinilleras de futbolistas son de plástico nanoestructurado para hacerlas más fuertes y ligeras; mucho más extendido es el uso de raquetas de tenis de plástico reforzado con nanotubos de carbón, sobre todo desde que Roger Federer empezó a usarlas con gran éxito.

El mundo de la cosmética parece especialmente atraído por las posibilidades de los nanoproductos: la compañía con más patentes en nanotecnología no es, como pudiera pensarse, IBM, General Electric, o Johnson & Johnson, sino L’Oreal. Numerosos productos de belleza y cremas de protección contra el sol contienen nanopartículas que realzan sus propiedades o disminuyen sus inconvenientes, como es el caso de las nanopartículas de óxido de titanio o de zinc, que bloquean los rayos ultravioletas sin dejar sobre la piel esa capa blanca tan característica de las cremas con mayor índice de protección solar.

Para el futuro se habla de ordenadores que usarán como transistores nanotubos de carbón; nanomateriales para electrodos de baterías capaces de almacenar diez veces más electricidad que las actuales; nanofotocatalizadores que ayudarán a producir energía y purificar el agua; «nanofábricas» que recogerán automáticamente materias primas en los alrededores de un órgano para sintetizar medicinas luego liberadas en ciertos momentos y en determinadas dosis; y nanoherramientas que medirán la actividad de millones de neuronas para crear un mapa detallado del cerebro, entre un sinfín de posibilidades.

El fascinante mundo de la nanotecnología, o *nanomundo*, que se avecina podría parecer una quimera de ciencia ficción, sin embargo está bien anclado en la realidad de la ciencia moderna, como explica en detalle este libro. Escrito de forma sencilla para llegar al no especialista en ciencia o tecnología, el libro comienza sentando las bases científicas del nanomundo y describiendo las herramientas esenciales para fabricar, caracterizar, y manipular los nanomateriales, algunos de los cuales se presentan a continuación, agrupados por familias o funcionalidad. La segunda parte se centra en tres grandes grupos de aplicaciones —tecnologías de la información, química y biomedicina— que ilustran la realidad y el potencial de la nanotecnología. El libro termina con una reflexión sobre la evolución de la tecnología y el conocimiento, y la respuesta de la sociedad a las incertidumbres y temores naturales en toda situación de cambio, más aún cuando se trata de materiales con propiedades a veces insospechadas. Pero son precisamente esas propiedades las que abren un mundo nuevo, el nanomundo que el lector tiene en sus manos.

Emilio Méndez es director del Centro de Nanomateriales Funcionales del Laboratorio Nacional de Brookhaven en Nueva York y catedrático de Física en la Universidad de Stony Brook. En 1998 fue galardonado, junto con el físico Pedro Miguel Etxenike Landiribar, con el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica. En 2000 recibió el Premio International Fujitsu de Dispositivos Cuánticos. Es miembro de Honor de la Sociedad Americana de Física, miembro del Comité Científico Internacional del centro Nanogune, del Patronato de la Fundación IMDEA Nanociencia, de la Fundación Bankinter para la Innovación, y de la Fundación del Consejo España-Estados Unidos.

— 1 —

INTRODUCCIÓN AL NANOMUNDO

Desarrollo de la investigación y tecnología al nivel atómico molecular o macromolecular, en la escala de 1-100 nanómetros, para obtener una comprensión de los fenómenos fundamentales y materiales en la nanoescala, y crear y utilizar estructuras, dispositivos y sistemas con nuevas propiedades y funciones originadas por su pequeño y/o intermedio tamaño.

Definición de la Fundación Nacional de la Ciencia de EE.UU.
(http://www.nsf.gov/crssprgm/nano/reports/omb_nifty50.jsp).

La nanotecnología estudia la manipulación de la materia a escala atómica y molecular.

Definición de Wikipedia

La figura con la que comenzamos este libro (Figura 1.1) muestra un ejemplo del trabajo realizado por algunos de los científicos del centro IMDEA Nanociencia situado en Madrid. Esta «sonrisa de CO» se obtuvo manipulando diez moléculas individuales de monóxido de carbono para colocarlas en las posiciones deseadas sobre una superficie de cobre, y el «nanoemoticono» pudo ser visualizado empleando un potente microscopio de efecto túnel. Hoy en día, este tipo de experimentos no nos sorprenden. En primer lugar, porque probablemente no se alcanza a comprender su significado último o su relevancia. Así, en los foros abiertos de la edición digital donde se publican este tipo de noticias, un lector escribía el siguiente comentario: «en esto se divierten y malgastan el dinero de investigación nuestros científicos». En parte es comprensible el malestar del lector, ya que los investigadores, en muchas ocasiones, no somos capaces de difundir la motivación que lleva a realizar este tipo de experimentos. En un afán por atraer la atención de un público con poca formación científica, presentamos los resultados de la manera más espectacular posible, tanto que finalmente pueden llegar a perder su sentido. Algunas veces, la ciencia transmite la sensación de que se estudian cuestiones intrascendentes o de que los investigadores realizan su trabajo fundamentalmente «para divertirse». Una divulgación adecuada es realmente difícil de conseguir ya que los lectores poseen una formación muy heterogénea, con una cultura científica por lo general escasa y además los temas que se pretenden divulgar son muy especializados.

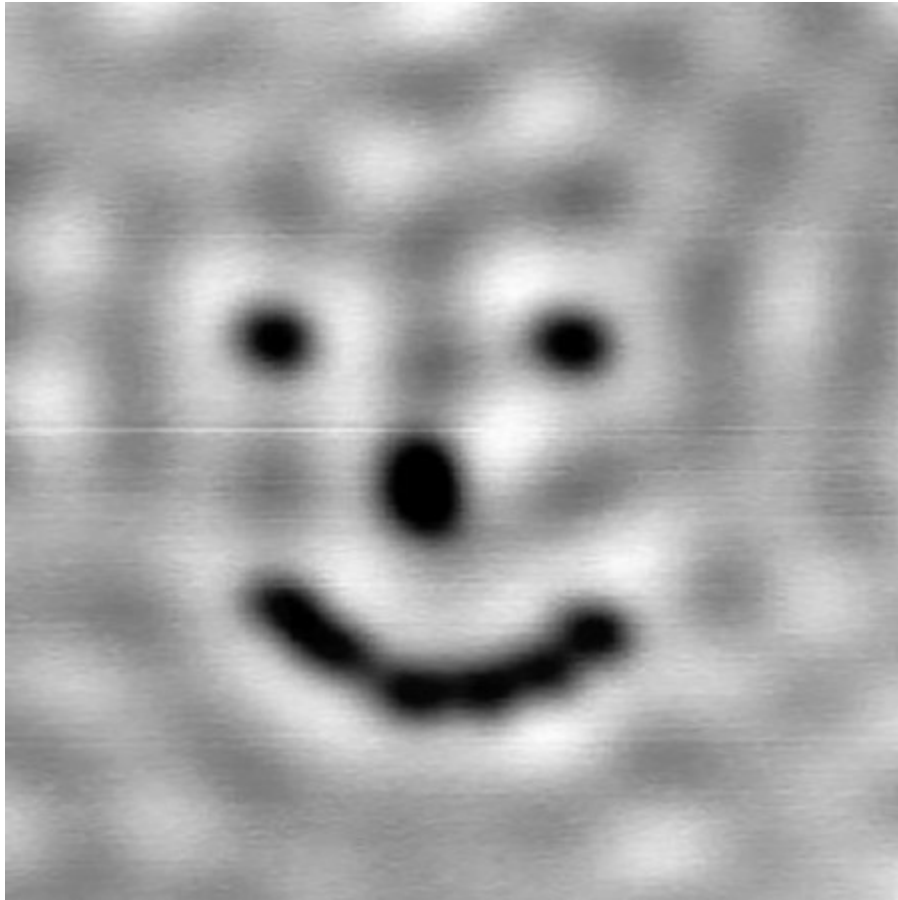


FIGURA 1.1. Sonrisa de CO. Cada bola negra es una molécula de monóxido de carbono (CO) depositada sobre una superficie. Gentileza de IMDEA-Nanociencia.

Por otra parte, figuras como ésta pueden no sorprender al público porque nos hemos acostumbrado a leer o escuchar infinidad de noticias científicas espectaculares. Tenemos la impresión de que con la ciencia y la tecnología todo es posible, y si no lo es en el presente lo será en un futuro muy cercano. La rápida evolución de la electrónica, que ha invadido nuestros hogares con dispositivos cada vez más potentes y versátiles, o los continuos progresos en medicina no invasiva, han ayudado a afianzar esta idea. Y no cabe duda de que tal percepción sobre los avances científico-tecnológicos es particularmente acertada cuando hablamos de nanotecnología.

Cuando se oye la palabra «nanotecnología» la mayor parte del público, aun sin tener claro su significado, piensa en robots o dispositivos de muy pequeño tamaño que llegarán a nuestras vidas para convivir con nosotros. Se espera que la gran capacidad de la ciencia para manipular lo más pequeño revolucione aún más nuestra forma de vida, y que sus creaciones se instalen de manera definitiva en todos los ámbitos, desde la medicina hasta el ocio, pasando por campos tan dispares como los nuevos materiales o la construcción de edificios. Esta percepción de la nanotecnología es una espada de doble filo. Por una parte alimenta nuestra imaginación y esperanza en un futuro mejor,

pero por otra nos genera incertidumbre y miedo. Miedo a los efectos para la salud, a la deshumanización e incluso a que los «nanorrobots» se acaben apoderando del mundo en un escenario catastrófico similar al que hemos visto en tantas películas de Hollywood. De hecho, en una parte del imaginario colectivo, los peores enemigos de la especie humana son unos personajes peculiares: los científicos locos y ansiosos de poder. Ellos desencadenan devastadoras epidemias, fabrican terroríficas armas letales, están detrás del cambio climático, contaminan el planeta, provocan guerras nucleares, o fabrican en sus laboratorios clones que se apoderan de los humanos. Ahora, además, son capaces de construir nanomateriales y nanodispositivos que pueden incluso controlarnos desde nuestro interior. Así, comienzan a aparecer libros y películas en los que «los malos» han sido construidos en laboratorios secretos y tienen un nombre propio: nanorrobots autorreplicantes. ¿Qué superhéroe parará la ambición de estos nuevos villanos? Un ejemplo real del miedo generado lo encontramos nada menos que en el príncipe Carlos de Inglaterra, quien, temeroso de que los nanorrobots aniquilen la vida en nuestro planeta, pidió a la Real Sociedad de Londres que investigase el riesgo de la nanotecnología y pusiese en marcha una moratoria a su implantación. Esta petición fue aplaudida por muchos grupos radicalmente opuestos al desarrollo científico.

Los riesgos de la implantación de cualquier nueva tecnología son inciertos y sin duda deben ser evaluados. Por ello, en la actualidad los científicos están debatiendo la eventual peligrosidad de la nanotecnología, mientras la población mira con ojos críticos estos nuevos avances. Se plantea un dilema entre aceptar el progreso que supone un nuevo desarrollo científico revolucionario o escudarnos en el miedo a generar un efecto no deseado a escala global. Como resultado, la sociedad no sabe si acoger con ilusión las nuevas ideas o rechazarlas e impedir su desarrollo.

A todos nos cuesta discernir si muchas de las propuestas científicas se convertirán en realidad o quedarán como mera ciencia ficción. Así, la imagen mostrada en la Figura 1.1 ¿es el reflejo de una revolución tecnológica que puede tener aplicaciones en nuestra vida o no es más que un entretenimiento de frikis que resultará irrelevante en el mundo real? Por lo general, faltan criterios y se carece de la cultura necesaria para comprender los fundamentos esenciales que están detrás de los avances científico-técnicos. Resulta paradójico que hoy en día, viviendo en una sociedad altamente tecnificada en la que no podemos imaginar la vida sin los ordenadores, los teléfonos móviles o los medicamentos, una parte de la sociedad haya vuelto la espalda al conocimiento científico. La ciencia y la tecnología no son consideradas parte de un saber imprescindible, pilares de la cultura como lo son las humanidades y las artes. Así, esta ignorancia se convierte en un terreno abonado para quienes se lucran con el auge de las pseudociencias de toda índole, desde las cartas astrales hasta las «energías

ocultas», pasando por todo tipo de creencias irracionales.

La sociedad vive un momento de confusión ante la nanotecnología y no sabe si ya existen nanorrobots submarinos que patrullan por la sangre buscando infecciones o si están a punto de fabricarse en algún laboratorio clandestino. La rapidez con la que las nuevas tecnologías se han instalado en la sociedad, la ingente cantidad de noticias (muchas veces contradictorias) que se suceden sobre estos temas y la falta de comprensión de las mismas han contribuido a que no sepamos diferenciar entre lo posible y lo imposible, entre la ciencia ficción del presente y lo que será tecnología del futuro. Sin embargo, queramos o no, formamos parte de una realidad condicionada por los avances científico-técnicos y el siglo XXI va a ser el de la nanotecnología. Por tanto, debemos hacer un esfuerzo para prepararnos y conocer las tendencias actuales en tecnología. Ése es uno de los objetivos de esta obra: proporcionarnos algunos de los conocimientos necesarios, y por tanto dotarnos de criterios, para poder forjarnos una opinión seria y personal sobre el tema. Porque todo tiene una doble vertiente: su ying y su yang, sus costes y sus beneficios. También la nanotecnología. Para entender esta contradicción podemos pensar en un ejemplo cercano, tomado de otro ámbito: el problema de la generación de la energía. La sociedad necesita obtener energía, pero la podemos obtener barata y sucia, accesible rápidamente para todos, o por el contrario más cara y limpia, lo que supone invertir para disminuir el impacto ambiental. De igual manera, la nanotecnología es un tema complejo que nos afecta a todos, es una realidad sobre la que la sociedad tiene que opinar y legislar. Es, por tanto, necesario formarse una opinión sobre este nuevo reto tecnológico: entender lo que es, sus riesgos, sus dificultades, su coste.

En cualquier caso, la nanotecnología se nos muestra hoy como una potentísima herramienta capaz de volver a transformar la sociedad como ya lo hiciese la microelectrónica a mediados del siglo XX. La potencialidad de sus nuevos desarrollos en todas las áreas del conocimiento parece verdaderamente ilimitada. Uno de los objetivos de este libro es mostrarnos qué se entiende en realidad por nanociencia y nanotecnología, darnos una idea certera y actualizada sobre la «hoja de ruta» para su implantación y discutir tanto sus promesas como sus peligros.

El libro está compuesto por un capítulo general (el Capítulo 2), en el que se revisan los conceptos principales de la nanociencia y la nanotecnología, seguido de varios capítulos específicos (del 3 al 7) dedicados a las diversas áreas de aplicación en distintos ámbitos científico-técnicos. La obra acaba con un capítulo en el que se revisan las consecuencias sociales y las perspectivas de la nanotecnología, mostrando además los principales «nanoproductos» que ya están en el mercado. El objetivo que los autores nos propusimos al escribir esta obra fue que cada uno de los capítulos

especializados se pudiese leer de manera independiente, sin requerir muchas ideas o conceptos de partes anteriores. Así un lector que tuviera curiosidad, por ejemplo, en nanoelectrónica y nanomateriales, podría leer sólo esos capítulos. Por ello es posible que el lector encuentre algunos ejemplos reiterados, que se tratan en distintos capítulos, aportando en cada caso una visión complementaria. Esperamos que la obra resulte interesante a todos los que ahora la tienen en sus manos, y que al terminar este «viaje por el nanomundo» sientan que comprenden mejor las claves de la nanociencia y la nanotecnología.

— 2 —

NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA

Nada existe sino átomos y espacio vacío. Cualquier otra cosa es una opinión. Los mundos son ilimitados. Aparecen y desaparecen. Más que eso, los átomos son ilimitados en tamaño y número, y son transportados por el universo en un torbellino, y así generan todos los compuestos: fuego, agua, aire y tierra. Incluso estos elementos son conglomerados de átomos. Y es debido a su solidez que son impasibles e inalterables. El sol y la luna han sido compuestos de estas suaves esferas masivas —los átomos—, y también el alma.

DEMÓCRITO DE ABDERA, 460 a. C.-ca. 370 a. C. Cita recogida por Diógenes Laercio IX, 44.
Trad. R. D. Hicks Vol. 2, pp. 453-455 (1925).

2.1. Hacia lo más pequeño: el mundo invisible

Un colega de los autores de este libro nos contó que en el año 1988, en un laboratorio francés, durante la realización de su tesis doctoral intentaba poner en marcha el que sería el primer microscopio de efecto túnel del país. Este tipo de microscopio debía permitirle ver los átomos que forman la superficie de los materiales, pero en esos momentos la tecnología necesaria no estaba suficientemente desarrollada y aquello no era, por tanto, una tarea fácil. Hacía tan solo cuatro años que dos investigadores de la multinacional IBM, G. Binnig y H. Rohrer, habían ganado el Premio Nobel de Física por inventar este tipo de microscopios y mostrar al mundo algo con lo que quizá soñó Demócrito: las primeras imágenes de los átomos. Nuestro amigo había tratado durante meses de obtener imágenes con sentido en una pantalla de ordenador, aunque solo consiguió registrar una colección de líneas inconexas. El trabajo resultó ser tedioso. Día tras día intentaba comprender qué significaban esas líneas y el motivo por el que no se superponían para formar una imagen coherente, como las que ya habían conseguido algunos otros laboratorios en el mundo. Pasaron casi seis meses sin ningún resultado, en los que nuestro colega y su equipo modificaron el diseño mecánico, comprobaron cada parte de la electrónica, estimaron la influencia de las vibraciones del suelo... Sin saberlo, estos científicos estaban contribuyendo al nacimiento de lo que hoy en día se conoce como nanotecnología.

Durante estas deprimentes sesiones, un investigador de avanzada edad, Jean Baptiste, perteneciente a un laboratorio cercano que conocía el obstinado empeño de nuestro amigo, se pasaba con frecuencia a visitarlo. Se sentaba al lado del ordenador que tomaba los datos y preguntaba: «¿Cómo va? ¿Cuándo voy a poder ver los

átomos?». Su pregunta, lejos de ser irónica o maliciosa, era entusiasta y estaba llena de esperanza. Esas visitas animaban las aburridas jornadas de experimentos y daban ánimos a todo el equipo para continuar. Este científico llevaba toda su vida profesional estudiando, mediante técnicas de difracción y complicados cálculos matemáticos, dónde se colocaban los átomos en las superficies de los materiales. Ahora, un grupo de investigación, al lado de su laboratorio, había construido un pequeño aparato que iba a mostrarle cómo eran esos átomos a los que tantas horas de elucubraciones había dedicado. Podría verle la cara a los átomos y no quería perderselo. Por desgracia, el profesor Baptiste se trasladó de ciudad antes de que el microscopio funcionase, en 1989. La primera foto que lograron obtener, operando el microscopio en vacío, se muestra en la Figura 2.1.

Ver los átomos ha sido siempre un sueño para los científicos que estudian la materia. «Nuestros componentes últimos», así nos enseñaron a llamarlos cuando éramos estudiantes de bachillerato. A esa edad no comprendíamos muy bien el significado de esas palabras y hoy en día, además, sabemos que esa definición no es del todo correcta ya que éstos pueden dividirse en partículas aún más pequeñas denominadas electrones, protones y neutrones. A su vez, estos dos últimos están formados por otras partículas llamadas quarks, que se han descubierto haciendo chocar núcleos atómicos a velocidades cercanas a las de la luz en los llamados aceleradores de partículas. Esta manera de estudiarlos es muy burda: a golpes. Es algo así como romper un reloj a martillazos e intentar saber cómo funcionaba examinando los trozos de los engranajes destrozados que se han obtenido. Los quarks son, junto con algunas otras, las llamadas partículas elementales, las que no pueden subdividirse, los verdaderos componentes últimos de la materia (¿por ahora?).

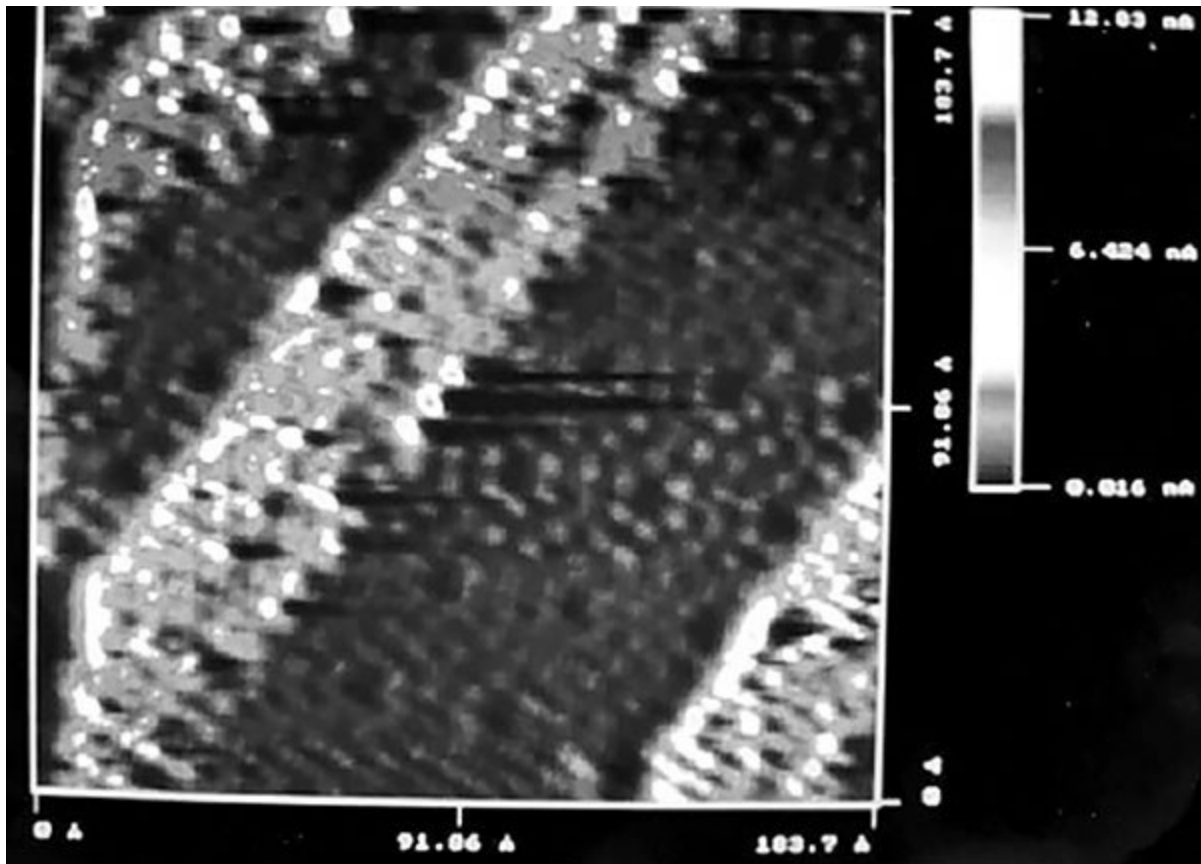


FIGURA 2.1. Imagen obtenida en 1989 con un microscopio de efecto túnel, conocido como STM. Los puntos más brillantes y ordenados en forma hexagonal corresponden a átomos de silicio. La imagen se tomó haciendo una fotografía a la pantalla del ordenador.

El átomo mide casi mil millones de veces menos que un metro (como veremos, eso es un nanómetro) y el protón es todavía un millón de veces menor, es decir, mide del orden de un femtómetro. Imaginemos al átomo como una esfera gigante en cuyo centro se encuentra el pequeñísimo núcleo atómico. Buscando un símil sería algo parecido a tener un grano de arroz flotando en mitad de un estadio de fútbol. Toda la masa está concentrada en el grano: el resto, como decía Demócrito, es espacio vacío. Las partículas que componen el núcleo atómico escapan completamente a nuestras capacidades actuales de manipulación individual. Aunque su control por otras vías tenga un papel importante, por ejemplo, en la generación de energía nuclear, no sabemos cómo manejarlas con precisión y mucho menos cómo construir algo con ellas. Por tanto, los átomos constituyen los componentes más pequeños que pueden manipularse, sobre los que sabemos actuar de manera controlada y, por tanto, son los «ladrillos» a los que podemos recurrir para «construir». Su tamaño, como hemos dicho, es cercano al nanómetro.

El ser humano siente una curiosidad innata que le impulsa a conocer lo más grande y también lo más pequeño. De alguna manera se pregunta qué hay más allá de lo que

alcanzan a ver sus ojos, tanto hacia lo inmenso como hacia lo diminuto. Galileo construyó un telescopio a principios del siglo XVII que le permitió descubrir, entre otras cosas, las cuatro lunas más grandes de Júpiter. A partir de entonces los telescopios se han perfeccionado para mostrarnos cómo son las estrellas, las galaxias, las nebulosas... Sabemos que las distancias y tamaños en el universo son tan grandes que superan nuestra capacidad de comprensión. Así, una noche estrellada nos empequeñece y con frecuencia nos hace preguntarnos por nuestro insignificante papel en el cosmos. Curiosamente, en el extremo opuesto, pensar en lo más pequeño no nos hace sentirnos grandes. Durante una gran parte de la historia de la humanidad, el mundo de los objetos diminutos pareció no existir porque no se tenía la posibilidad de observarlo y sólo cuando se construyeron los microscopios, el primero también a principios del siglo XVII, se pudo descubrir un mundo fascinante, poblado por células, virus, moléculas, e incluso átomos... El mundo invisible es tan infinito y fascinante como el universo y aunque, por el hecho de no poder verlo, nos cueste imaginar y comprender el enorme número o la naturaleza de los objetos diminutos, es un reto acercarnos a la grandeza de lo pequeño. El viaje hacia el interior de la materia es conceptualmente mucho más complejo que la exploración del cosmos. Hay varios motivos para ello. Por una parte, la falta de imágenes mentales o representaciones conceptuales de los objetos micro y nanométricos y, por otra, la complejidad de las herramientas necesarias para su estudio. Estas dificultades son sin duda una barrera para que la sociedad se acerque a conocer el mundo atómico y sus posibilidades. Y así, mientras disfrutamos de las fotografías de galaxias, planetas o mundos lejanos, sentimos menos fascinación por las imágenes de los «seres» (animados o inanimados) que habitan el mundo de lo más pequeño, aunque se encuentran mucho más cerca de nosotros: en nuestra piel, en la superficie de las hojas de este libro o en la pantalla en la que algunos lo están leyendo.

La nanociencia trata de comprender y manipular ese mundo «infinito» de lo más pequeño. Eso es lo que intentarán las páginas de este libro: acercarnos a él y mostrarnos, mediante ejemplos extraídos de los laboratorios de investigación, cómo es el mundo *allá abajo*, qué objetos lo pueblan, qué leyes lo gobiernan y cómo podemos aprovecharnos de ellos y de sus propiedades para construir tecnología que nos sirva *aquí arriba*.

«Nano» es un prefijo griego que significa diminuto, pequeño. Este prefijo se utiliza en el sistema internacional (S.I.) de unidades para indicar un factor de 10^{-9} (es decir, multiplicar algo por 0,000000001, o lo que es lo mismo, la milmillonésima parte de algo). Así, podríamos decir que nanociencia es el estudio de los objetos con tamaño mil millones de veces más pequeños que un metro (nanométricos). Aunque este prefijo acompaña a unidades de medida podemos extrapolar su uso y así por nanoquímica o

nanomedicina entendemos la aplicación de la nanotecnología a los campos de la química o la medicina, y por nanomundo o nanoescala nos referimos a objetos o procesos que existen o tienen lugar cuando sus longitudes típicas son nanométricas.

Un nanómetro (nm) equivale a, una longitud unas 80 000 veces más pequeña que el diámetro de un cabello humano. Aunque esta unidad escapa por completo a nuestra experiencia cotidiana, es fundamental en la naturaleza. Si imaginamos una regla con divisiones de un nanómetro, dos marcas consecutivas en la regla encerrarían unos 5 átomos, o también si la utilizásemos para medir el ADN de nuestras células, tres marcas consecutivas delimitarían el diámetro de la doble hélice. Es decir, con una regla dividida en nanómetros seríamos capaces de medir los objetos más pequeños de la naturaleza que sabemos manejar.

Visualizar de manera intuitiva lo que significa la palabra «nano» es muy difícil. Una milmillonésima parte de algo se refiere a un concepto extremadamente pequeño, que escapa a nuestra intuición o experiencia cotidiana y, por tanto, su valor absoluto carece de significado para nosotros. Los valores pequeños son tan lejanos a la intuición como los grandes, pues de hecho tampoco comprendemos bien que una estrella pueda estar a 20 años-luz de nosotros, que «el agujero» de un banco sea de 25 000 millones de euros o que el presupuesto español dedicado a la ciencia se haya reducido durante los últimos tres años en más de 3000 millones de euros. Son cantidades tan lejanas a nuestro mundo diario que no nos hacemos una idea precisa de lo que significan. Para crearnos una imagen que nos indique cómo de grande es una molécula o cómo de pequeño es un nanómetro, podemos recurrir a algunos ejemplos visuales. En este mismo instante y sin que nos demos cuenta, nuestras uñas y pelos están creciendo del orden de 5 nm cada segundo. Si suponemos que la distancia entre átomos es de 0,2 nm y que el diámetro de un pelo es 0,1 mm (100 000 nm), y hacemos una pequeña cuenta, llegaremos a la conclusión de que para que el cabello crezca 5 nm por segundo, aproximadamente en cada segundo se están agregando más de diez billones de átomos a cada uno de nuestros pelos.

Otro ejemplo que puede ayudarnos a visualizar la inmensidad de lo pequeño es la amplificación que tenemos que hacer de una molécula para que resulte comparable con un objeto de nuestro entorno. Pongamos como ejemplo un fullereno: una molécula formada por 60 átomos de carbono, que mide 1 nm de diámetro y cuya forma es exactamente la misma que un balón de fútbol. Pues bien, lo que tendríamos que reducir el balón de fútbol para convertirlo en un fullereno es aproximadamente lo mismo que tendríamos que reducir nuestro planeta para que se convirtiera en un balón de fútbol: cien millones de veces.

Un último ejemplo para hacernos una idea intuitiva del mundo nanométrico y de sus

tamaños está relacionado con la siguiente cuestión: ¿qué hay más, estrellas en el universo o moléculas de agua en el mar? Cuando en conferencias de divulgación se plantea esta pregunta, la mayor parte del público, dejándose llevar por un primer impulso, contesta que hay más estrellas. Otros, intuyendo que la pregunta tiene trampa, responden un «quién puede saberlo». Lo cierto es que ambas cantidades se pueden calcular con bastante aproximación. La NASA estima que en el universo accesible, el que podemos observar, debe de haber unas 10^{23} estrellas (es decir, en notación científica, un uno seguido de 23 ceros: 100 000 000 000 000 000 000 000). Este número es tan grande que nos cuesta comprender su significado. Para hacernos una idea imaginemos que pusiésemos a contar a todos los habitantes de la Tierra, sin dormir ni comer, una estrella por segundo. En esas condiciones estaríamos contando más de 100 000 años. Por otra parte, un sencillo cálculo del volumen de agua contenida en todos los océanos del planeta nos revela que hay alrededor de 5×10^{45} moléculas, es decir, más de veinte ceros a la derecha de diferencia con el número de estrellas. En este caso, contar todas las moléculas de agua nos llevaría un tiempo mayor que el de la existencia del universo.

Una vez que disponemos de una regla de dimensiones nanométricas y que hemos adquirido algunas imágenes conceptuales de lo que significa el nanómetro, podemos pasar a describir los objetos que tienen tamaños comprendidos entre 0,1 y 100 nm. Es decir, vamos a identificar los objetos más pequeños que se pueden combinar entre sí para construir la diversidad del mundo que nos rodea. Estos se conocen como los «ladrillos de la nanotecnología» y pueden dividirse en naturales o artificiales. Entre los que nos proporciona la naturaleza, nos interesan los que son más pequeños que una bacteria (cuyo tamaño típico es de un micrómetro o «micra»), como virus, proteínas, ácidos nucleicos, moléculas orgánicas e inorgánicas, y átomos. Los primeros de esta lista resumida son objetos de estudio de la nanobiología o nanomedicina (como veremos en el Capítulo 7), los intermedios pertenecen al ámbito de la nanoquímica (Capítulo 6) y los últimos al de la física (Capítulo 5). Sin embargo, no sólo disponemos de ladrillos naturales, sino que también se han construido muchos otros en laboratorios. Éstos son innumerables e incluyen nanopartículas (agrupaciones de decenas de átomos de un material), nanotubos de carbono (un plano atómico de carbono enrollado sobre sí mismo formando un cilindro), fragmentos de grafeno (una lámina bidimensional de átomos de carbono), o nuevas moléculas orgánicas y sus combinaciones. Algunos de ellos están representados en la Figura 2.3. En los siguientes capítulos los conoceremos más y mejor, tanto a ellos como a sus posibles aplicaciones.

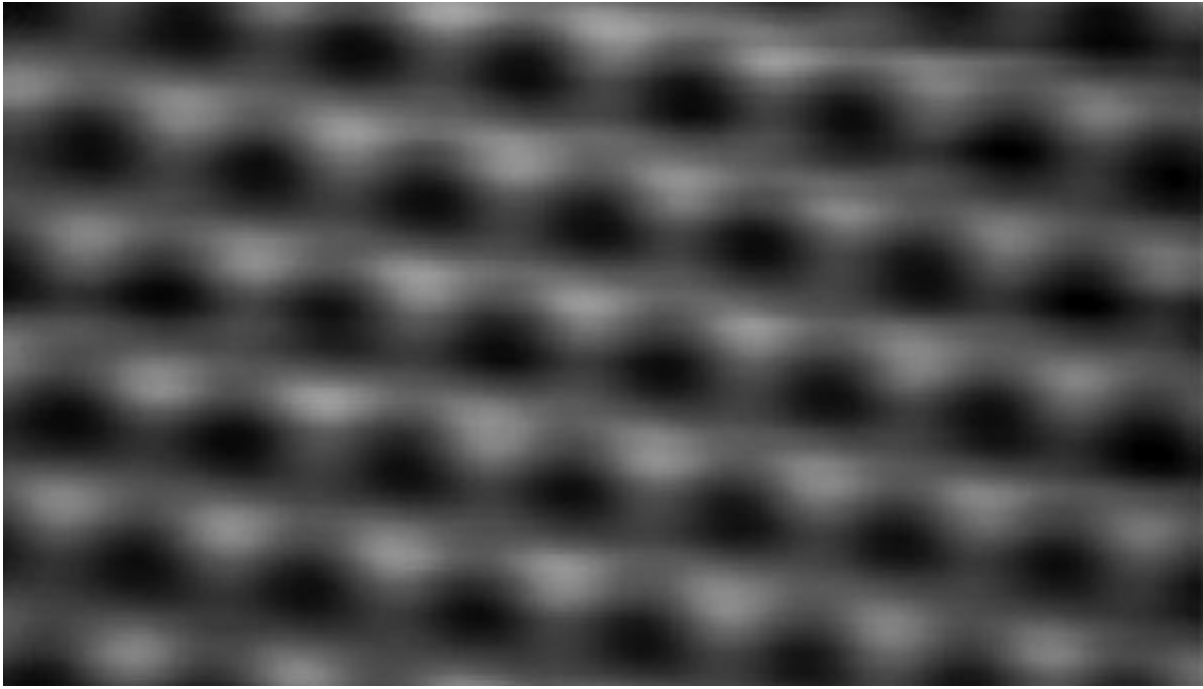


FIGURA 2.2. Imagen tomada con un microscopio de efecto túnel, STM, que muestra los átomos de una superficie de grafeno, en la que se distingue su colocación en forma de panal de abeja. Gentileza del grupo ESISNA, ICMM-CSIC.

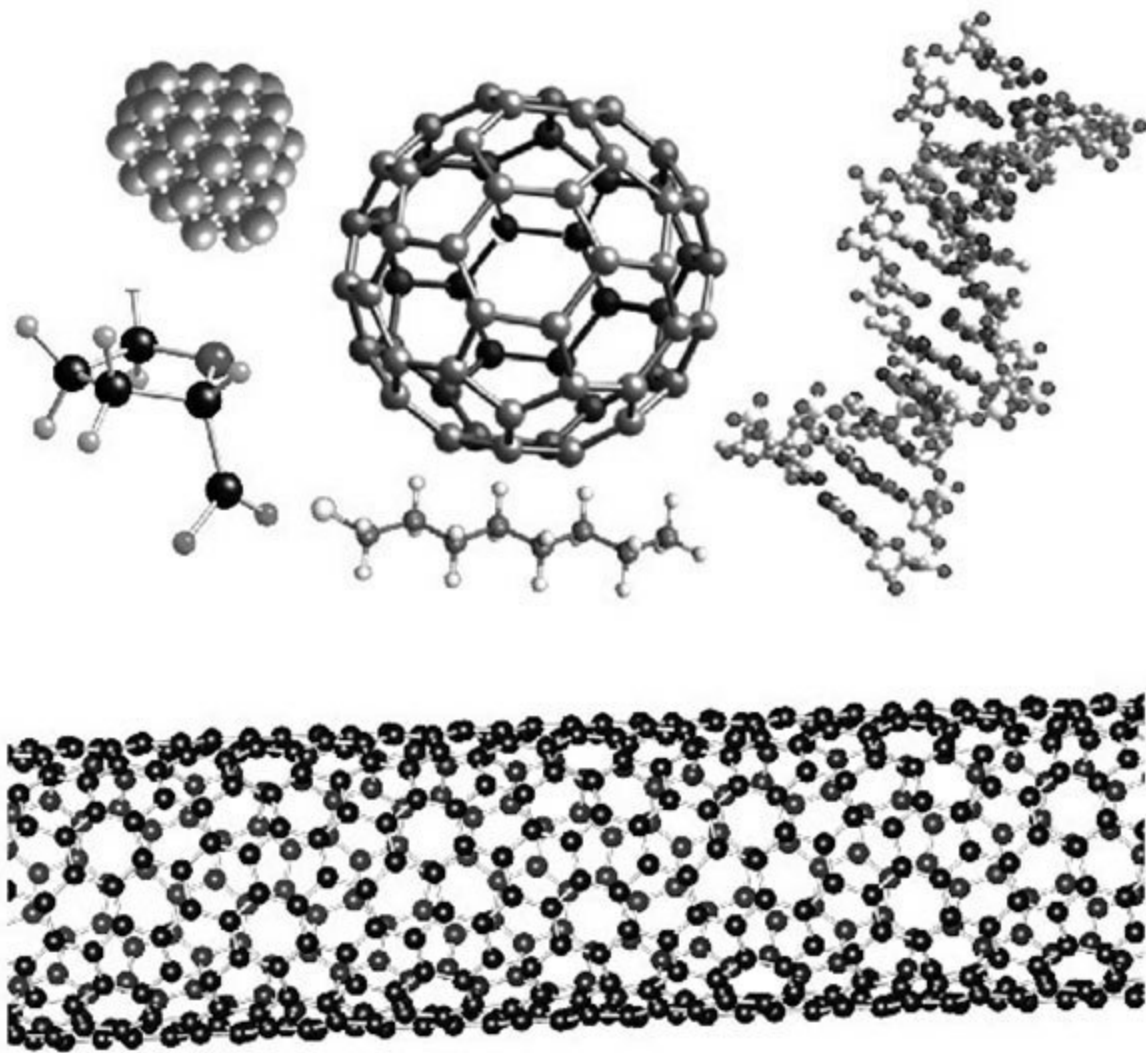


FIGURA 2.3. Algunos de los ladrillos utilizados en el nanomundo para construir el macromundo. De izquierda a derecha y de arriba abajo: nanopartícula de oro, fullereno, doble hélice de ADN, molécula del aminoácido prolina, alcanotiol y nanotubo de carbono.

Con ellos iremos descubriendo cuáles son los límites entre lo posible y lo imposible en esta nueva ciencia, que va definiéndose día a día con nuevos y sorprendentes hallazgos. Éste es el trabajo continuo, callado y largo que se realiza en diferentes laboratorios y grupos de investigación en todo el mundo. Gracias a ellos, la ciencia pasará a ser tecnología, y algunos de los experimentos y prototipos del laboratorio entrarán en nuestros hogares, y lo que hoy parece ciencia ficción se irá haciendo realidad quizá más rápido de lo que pensamos.

2.2. Nanociencia y nanotecnología

Es preciso recordar la diferencia entre ciencia y tecnología. De una manera general,

podemos decir que ciencia es el conocimiento obtenido a partir del trabajo realizado en un laboratorio de investigación en el que se busca o prueba una capacidad o una ley de la naturaleza. La observación, experimentación y modelización permiten plantear preguntas y construir hipótesis, lo que lleva a elaborar leyes generales sujetas a comprobación o refutación experimental. La ciencia es necesidad de saber, es un reflejo de la curiosidad del ser humano, planteada de forma objetiva y utilizando el método científico. La síntesis de una nueva molécula, la manipulación de una proteína, la descripción del mecanismo que sigue una reacción química o la determinación de las posiciones de los átomos de un material son algunos ejemplos del trabajo científico que se lleva a cabo en un laboratorio. Los resultados obtenidos de cada una de estas investigaciones se redactan en forma de artículo científico y, después de superar un examen crítico por parte de otros investigadores, se publican en revistas científicas internacionales. En otras ocasiones los resultados se presentan en congresos o reuniones científicas especializadas. De esta manera se da acceso al conocimiento generado, para así comprobar o rebatir, mejorar o completar las ideas y conceptos publicados.

La tecnología, a su vez, parte de los conocimientos básicos establecidos por la ciencia o bien de un procedimiento iterativo de prueba y error para construir un dispositivo, un nuevo material o una aplicación informática que tengan una utilidad determinada para la sociedad. El conocimiento necesario para generar este instrumento o proceso de fabricación se traduce habitualmente en una patente, como una forma de proteger esa invención y de ofrecer ciertos derechos a los inventores y a las entidades en las que se ha generado dicha patente.

La ciencia suele desarrollarse en universidades y organismos públicos de investigación (OPIs, un ejemplo de los cuales es, en España, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC) ya que no tiene una repercusión económica inmediata. Por el contrario, la tecnología se desarrolla principalmente en empresas y centros tecnológicos, ya que se busca un producto o proceso que se pueda comercializar, destinado directamente al usuario final. Algunas instituciones de gran tamaño como el CNRS (Centro Nacional para la Investigación Científica) francés, los institutos Max-Planck alemanes, el Instituto Nacional de la Salud de Estados Unidos o el CSIC español tienen la posibilidad de producir tanto conocimiento básico como un buen número de patentes. Así, normalmente, primero surge la ciencia y años después (o a veces nunca) la tecnología derivada de ella. Además, la tecnología generada proporciona nuevas herramientas a los científicos con las que estudiar nuevos conceptos, que a su vez generarán nueva tecnología. De esta manera ciencia y tecnología son las dos caras de una misma moneda y se convierten en una rueda

imparable que ha hecho, y sigue haciendo, avanzar a la humanidad.

En el ámbito de las ciencias biológicas encontramos un ejemplo claro de la relación entre ciencia y tecnología. En el año 1976, un grupo de «científicos básicos» descubrió que una proteína de una bacteria termófila (es decir, que vivía en medios con altas temperaturas, entre 50 y 80 °C) permitía copiar o replicar distintas moléculas de ADN. A esta proteína se le denominó «polimerasa *Taq*», por las iniciales del microorganismo del cual se había aislado (*Thermus aquaticus*). Esta investigación parecía muy fundamental y con escasa utilidad tecnológica, pero en 1983 el científico K. Mullis ideó una aplicación práctica basada en ella: aprovechando la capacidad de la polimerasa *Taq* para replicar ADN a altas temperaturas, inventó un sistema de amplificación del ADN denominado «reacción en cadena de la polimerasa». (PCR, por las iniciales en inglés de *Polymerase chain reaction*), que podía automatizarse fácilmente. La empresa en la que trabajaba Mullis patentó la tecnología de la PCR y él recibió el Premio Nobel de Química en 1993. Hoy en día la PCR se utiliza en todos los laboratorios de biología molecular del mundo y su uso ha permitido cientos de nuevos descubrimientos científicos.

Actualmente, en el mundo «nano» vivimos una etapa esencialmente científica. Estamos adquiriendo el conocimiento necesario para mover, manipular y construir objetos de tamaños nanométricos en laboratorios de investigación (nanociencia), que podrán ser utilizados en un futuro cercano para realizar una función específica dentro de un determinado dispositivo (nanotecnología). Podemos decir que la nanociencia trata de lo de «allá abajo», mientras que la nanotecnología de lo de «aquí arriba». Dicho de otra manera, actualmente hemos avanzado bastante en lo que a nanociencia se refiere y estamos desarrollando las primeras aplicaciones nanotecnológicas. No obstante, y como veremos, aunque ya hay bastantes nanoproduitos en el mercado, muchas de las aplicaciones más espectaculares todavía están lejos de su comercialización. Así, podemos afirmar que la nanotecnología se habrá generalizado a mediados de este siglo: ésa será la tecnología que disfrutarán plenamente nuestros hijos.

Todos hemos jugado alguna vez a imaginar cómo será el futuro, pero es muy difícil aventurar la velocidad a la que se producirán los avances tecnológicos que lo van a protagonizar. Por ejemplo, la rapidez con que la microelectrónica ha cambiado nuestra forma de vivir es sorprendente: instrumentos o aparatos que hace pocos años eran considerados ciencia ficción ahora están en nuestros hogares y forman parte de nuestra vida cotidiana. Parece inevitable depositar unas elevadas expectativas en el «nanofuturo», aunque muchas veces no guarden relación con la base científica que las sustenta. La ciencia parece haber llegado a un momento de gloria en el que todo puede ser explicado y realizado. Nos ha enseñado a soñar y fantasear con el futuro. Tanto es

así que hoy en día los consumidores no saben distinguir entre lo que será real y lo que seguirá siendo ciencia ficción. Es decir, entre lo que llegará a nuestras casas formando parte de la cotidianidad y lo que se quedará en el laboratorio como un mero experimento académico. Lo primero será tecnología, lo segundo parte de la ciencia básica necesaria para conseguirla.

Dado que la nanociencia nos explica cómo funciona la naturaleza a nivel atómico o molecular, nos muestra el camino para manipularla a voluntad. Sin embargo, el reto más importante es cómo convertir esas ideas científicas en una tecnología válida para nuestro mundo macroscópico: transformar la nanociencia en nanotecnología. La revolución científica que está produciéndose en el ámbito de lo «nano» no ha emergido de repente, sino que ha seguido un proceso silencioso y lento: podemos decir que se ha empleado casi un siglo en adquirir los elementos necesarios. Detrás de cada experimento espectacular, como el que se muestra en la primera figura de este libro, hay innumerables horas de trabajo previo: diseñando el proceso, construyendo dispositivos, apretando tornillos, buscando y justificando la financiación, aprendiendo de los experimentos fallidos. Al final, el trabajo de muchas personas durante muchos años se sintetiza en una sola figura, que representa el punto final del proceso. Es «el concierto de la ciencia», en el que antes del espectáculo final frente al público hay muchas horas de ensayo que no se van a escuchar cuando el director levante su batuta, pero que son necesarias para lograr un sonido armonioso. Una obra de arte es un hecho aislado y singular que, aunque enmarcado en un entorno histórico, es único. La ciencia es la obra de arte colectiva de la civilización. Cada equipo de investigación prosigue su trabajo en el punto en que el anterior lo dejó y explora los territorios en los que los demás todavía no habían podido o sabido adentrarse. Precisamente ese valor oculto de la ciencia, muchas veces poco valorado por las administraciones, es el primer paso necesario para conseguir su aplicación en forma de tecnología útil.

2.3. El ocaso de la tecnología actual

La tecnología de la que dispone una sociedad tiene el tamaño de las herramientas que se utilizan para fabricarla. Así, por ejemplo, en el Paleolítico se tallaban bifaces y raederas de sílex con los que se trabajaba la materia, generalmente otras piedras, huesos o pieles. Con técnicas derivadas de éstas se fabricaron cinceles y buriles primitivos con los que se realizaron las primeras representaciones gráficas hace unos 10 000 años. Podemos decir que «el tamaño de la tecnología» de la que se disponía en esa época, es decir el de los objetos que se podían construir, correspondía con el ancho

de la piedra utilizada, siempre en el rango de los centímetros. Poco a poco, las herramientas se fueron mejorando y esos cinceles se hicieron más pequeños, duros y precisos. En lugar de utilizar piedras, que eran frágiles y difíciles de manipular, se aprendió a moldear metales que además de más duraderos resultaban más afilados. En el siglo XVIII esas rudimentarias herramientas se fueron convirtiendo en destornilladores, pinzas, bisturís, tenazas... Así surgió lo que podríamos denominar «militecnología», tecnología fabricada con elementos de 1 milímetro, que dio lugar a la mecánica y a la revolución industrial, junto con todos los desarrollos que fueron caracterizando el siglo XIX. Durante el siglo XX se desarrollaron máquinas controladas mediante microscopios ópticos que permitieron crear nuevas herramientas más pequeñas y precisas con las que fabricar objetos diminutos. Había comenzado una carrera hacia la miniaturización que condujo finalmente a la «microtecnología», y ésta tuvo su máximo exponente en el campo de la electrónica. El desarrollo de nuevos conceptos científicos en el campo de la física de estado sólido, junto con las nuevas posibilidades para construir objetos micrométricos, dio lugar a la microelectrónica, que durante el siglo XX cambió la forma de vivir de la sociedad, abriendo las puertas a la computación y a las telecomunicaciones.

A la hora de desarrollar la tecnología micrométrica, una de las herramientas más importantes ha sido, y sigue siendo, los haces de electrones o iones utilizados como verdaderos cinceles. Estos «chorros» de partículas se han ido perfeccionando más y más a medida que se mejoraban otras tecnologías, como la de los sistemas de vacío o la óptica electromagnética, hasta conseguir generar haces de tamaño inferior a 10 nm. Estos equipos funcionan de manera similar a como escribían los habitantes primitivos sobre la roca, creando marcas o dibujos sobre la superficie del material. Los haces finos de iones o electrones quemar una zona dibujando sobre ella nuevas estructuras, es decir, «tatúan» la superficie de los materiales.

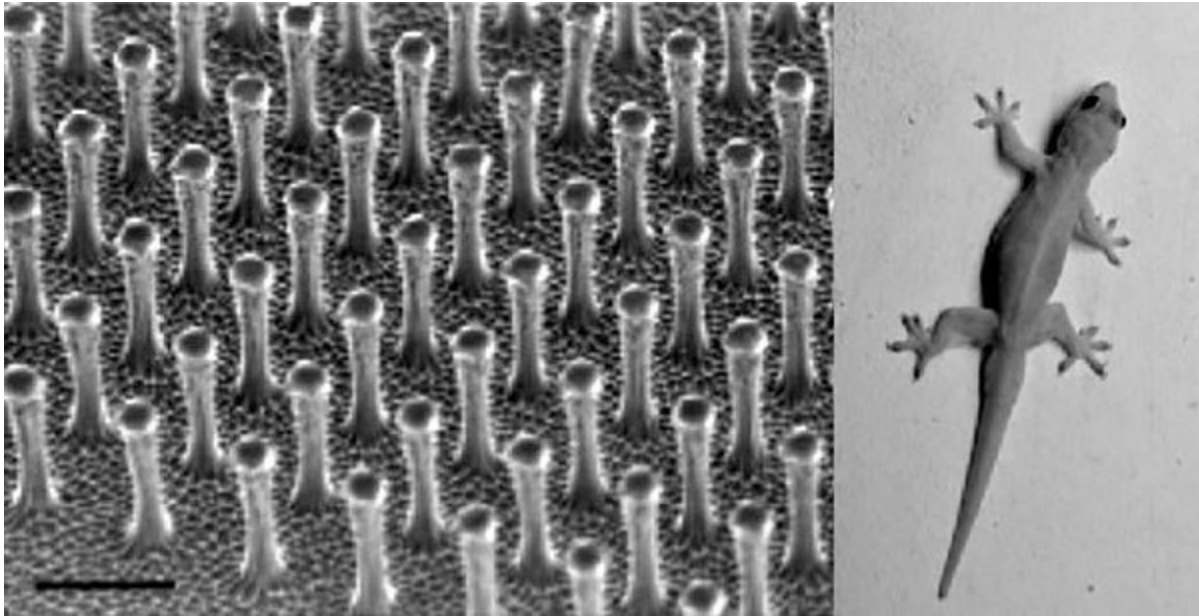


FIGURA 2.4. A la izquierda, imagen de microscopía electrónica de unos dedos artificiales de Kapton microfabricados, que imitan a los de una salamanguesa (fotografía de la derecha). Con estos materiales se podrían fabricar potentes adhesivos. La barra negra de escala es de 2 mm. Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd: *Nature Nanotechnology* n.º 2, p. 461, copyright 2003.

Un ejemplo puntero de lo que se puede hacer hoy en día con estas herramientas ha sido recientemente publicado por investigadores de la Universidad de Manchester en colaboración con un instituto de microelectrónica ruso. La salamanguesa (Figura 2.4) se adhiere a las paredes de manera tan eficiente que es capaz de trepar por ellas sin ninguna dificultad. Imaginemos que pudiésemos copiar el mecanismo y fabricar unos guantes especiales basados en ese mismo principio físico. Podríamos entonces soñar con escaladores encaramándose a lugares imposibles o limpiadores de cristales trepando por los rascacielos para acceder a los sitios más difíciles. Algo parecido al personaje de Spiderman. Pero, ¿cómo consiguen las salamanguesas desafiar a la gravedad? Un análisis microscópico de sus patas nos proporciona la respuesta. Estos pequeños reptiles han desarrollado una serie de pelos muy pequeños, de los que cada uno de sus dedos tiene aproximadamente medio millón. Pero lo más interesante es que cada pelo posee a su vez cientos de ramificaciones de unos nanómetros de diámetro, de manera que cuando se acercan a una superficie establecen cientos de uniones gracias a la aparición de las llamadas fuerzas de Van der Waals. Cada fuerza de interacción individual es muy pequeña, pero todas sumadas generan una fuerza de adhesión suficientemente grande como para soportar el peso de la salamanguesa. Pues bien, estos investigadores intentaron copiar este mecanismo y para ello fabricaron, utilizando haces de electrones, redes de pilares plásticos, utilizando un material llamado kapton. Estas estructuras, mostradas en la Figura 2.4, son flexibles, poseen una geometría optimizada para producir una adhesión colectiva, y miden 3 micras de alto y 200 nm en

su base, igual que los pelos de los dedos de la salamanquesa. Los investigadores que realizaron este trabajo estiman que una pieza de adhesivo de 1 cm² de este material tiene un millón de pelos y puede soportar un peso de 1 kg. Este nuevo material podría utilizarse, si se llegara a comercializar, como cinta adhesiva de altas prestaciones capaz de hacer, por ejemplo, que algunos vehículos escalen por las paredes. Entre los autores de este sorprendente estudio figuran A. Geim y K. Novoselov, investigadores que volverán a aparecer posteriormente en este libro ya que obtuvieron el Premio Nobel de Física en 2010 por sus investigaciones relacionadas con el grafeno, uno de los materiales más prometedores en el campo de la nanotecnología.

Este ejemplo ilustra otra de las características esenciales de la nanotecnología, que irá acompañándonos a lo largo de las siguientes páginas: su inspiración en la naturaleza para resolver problemas de muy diversa índole. A lo largo de millones de años, la evolución biológica por selección natural ha perfeccionado, mediante el método de prueba y error, las estructuras de los seres vivos para que éstos puedan sobrevivir en su ambiente o colonizar otros. Por tanto, la idea es construir tecnología (nuevos materiales, medicinas más eficientes, motores pequeñísimos, transistores más potentes) utilizando los mismos mecanismos físico-químicos que emplean los seres vivos. Imaginemos, por ejemplo, que pudiésemos «domesticar» un virus para que liberara un fármaco en lugar de su malicioso material genético dentro de las células que deseamos (por ejemplo, las que originan un tumor). Así podríamos curar enfermedades de una manera totalmente novedosa y muy eficiente. Como veremos en el Capítulo 7, hoy en día numerosos grupos de investigación están trabajando en este tipo de desarrollos.

Volviendo al proceso de miniaturización progresiva que hemos estado comentando, la forma de construir objetos más y más pequeños se conoce con el nombre de tecnología de fabricación descendente o «de arriba hacia abajo» (traducido del inglés, *top-down*). Buscando un símil sencillo, el fundamento de esta aproximación se asemeja al trabajo realizado por un escultor, el cual a partir de un bloque grande e informe de un material obtiene, a base de cincelar, pulir y modelar, un objeto más pequeño y con la forma deseada. Así, hasta ahora la tecnología parecía responder a una ley no escrita: «más en menos», es decir, conseguir más capacidades en menos espacio. Con esta máxima, la carrera hacia la miniaturización emprendida por la tecnología actual parece no tener fin. En 1965, un ingeniero llamado G. Moore estableció que la densidad de transistores incluidos en un dispositivo electrónico se doblaría cada 18 meses. Es lo que se conoce como la Ley de Moore, que expondremos en detalle en el Capítulo 5. Esta previsión se postuló con muy pocos datos experimentales y, contra todo pronóstico, se ha venido cumpliendo de manera precisa. Así, un procesador Pentium IV tiene en su interior aproximadamente 6 millones de transistores/cm², valor que

cuadruplica a los del Pentium I, creado sólo cuatro años antes. Estos transistores se litografian (se dibujan), como hemos comentado anteriormente, sobre superficies de silicio. La separación entre líneas en el año 2000 era de 180 nm y en el año 2008 de 45 nm. En el año 2010 IBM anunció que había pasado a 32 nm y al año siguiente Intel confirmó que había alcanzado los 22 nm. Extrapolando estos números, en el año 2016 la separación entre líneas debería ser de 10 nm, es decir tan solo unos 100 átomos separarían un transistor del siguiente. Si seguimos extrapolando, a mediados del siglo XXI llegaríamos a un límite absoluto: estructuras formadas o separadas por un solo átomo.

Aunque la Ley de Moore, o la carrera hacia la miniaturización, se ha cumplido inexorablemente durante más de cuarenta años, podemos vislumbrar una serie de limitaciones intrínsecas al tipo de planteamiento descendente en el que se basa la tecnología actual, y que parecen llevarnos al final de ese camino. La primera de ellas es sin duda el tamaño de las herramientas necesarias. Los haces de electrones o iones de los que hemos hablado no pueden ser infinitamente pequeños ya que están compuestos por partículas cargadas del mismo signo, que por tanto se repelen entre sí. Por otra parte, en la nanoescala surgen nuevas propiedades al reducir el tamaño, puesto que esto conlleva un aumento en la relación superficie/volumen. Muchas de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de una superficie son muy distintas a las del volumen del mismo material y, por tanto, las características del objeto cambian al reducir su tamaño. Por ejemplo, una bala redonda de pistola, fabricada con plomo, de 0,5 cm de diámetro, contiene aproximadamente 10^{12} átomos en la superficie y 10^{18} en el volumen, es decir, por cada átomo en la superficie hay un millón en el volumen. Sin embargo, si esa bola de plomo tuviese un diámetro de 2 nm, la llamaríamos nanopartícula metálica, y tendría unos 100 átomos en la superficie y 1000 en el volumen, es decir por 1 en la superficie habría 10 en el volumen. A medida que los objetos se hacen más pequeños, aumenta su relación superficie/volumen y se van convirtiendo más «en superficie». Como consecuencia de ello, los átomos tienen menos vecinos, aumenta la posibilidad de escapar del material, pueden «sentir» mejor la presencia de otros átomos externos y reaccionar con ellos. Estas modificaciones de las propiedades se conocen como «efectos de tamaño finito» y, como hemos visto, en la escala nanométrica son muy importantes.

Por último, además de estos efectos asociados al tamaño, cuando un objeto mide 1 nm o menos, aparecen otros efectos que son diferentes a los que gobiernan la materia a escala macroscópica: los llamados efectos cuánticos. La física cuántica requiere una nueva forma de pensar. En nuestro mundo las ecuaciones de Newton definen el movimiento de los cuerpos, las de Maxwell nos explican cómo se propaga la radiación

electromagnética y la Ley de Ohm gobierna el transporte eléctrico. Estas y otras leyes simples dejan de ser estrictamente válidas cuando tratamos con objetos muy pequeños, del tamaño del nanómetro. Así pues, los objetos que queremos utilizar para crear la nanotecnología están afectados por las leyes de la física cuántica. Esta disciplina rompe con nuestra forma racional de entender la realidad ya que sólo podemos describir la probabilidad de que un objeto esté en un determinado lugar o de que un suceso ocurra. Con el desarrollo de la física cuántica en la primera mitad del siglo XX, el concepto de átomo pasó de ser una certeza que nos permitía explicar la naturaleza y hacer predicciones fiables, a ser un concepto etéreo y de difícil comprensión dentro de nuestra lógica cartesiana. Estas nuevas leyes y fórmulas descritas por la teoría cuántica son verdaderamente sorprendentes ya que contradicen nuestra lógica basada en la experiencia del mundo cotidiano, pero son absolutamente necesarias para describir los procesos en el mundo de los objetos nanométricos.

No obstante, si los laboratorios o las empresas quieren seguir ofreciendo más capacidades en menos espacio, tienen que comenzar a buscar nuevas formas de reducir el tamaño o mejorar las prestaciones. El fin de la tecnología descendente se ha predicho en numerosas ocasiones, aunque parece que se resiste a llegar. Las empresas tecnológicas han invertido millones durante los últimos cincuenta años para conseguir cadenas de producción perfectamente optimizadas y económicas, y por tanto buscan estrategias para seguir utilizando sus instalaciones sin cambiar sus métodos. Una de las ideas que barajan actualmente las grandes multinacionales para seguir aumentando las capacidades de los dispositivos tecnológicos es la fabricación de estructuras en varias capas. Al estar separadas unas de otras, a distintas alturas, escapan de los efectos cuánticos debidos a la proximidad. Estas estrategias pueden hacer que la vida de la tecnología actual se prolongue todavía de manera saludable durante una decena de años. No obstante, parece claro que aunque Intel o IBM vuelvan a dar un salto en sus cadenas de producción de chips y comiencen a fabricar objetos de 10 nm, o incluso de 6 nm, la tecnología actual vislumbra un fin no muy lejano. Parece inevitable concluir que la forma descendente de crear tecnología desembocará en una vía muerta. La tecnología actual tiene un límite físico que impide su mejora y está claro que hacen falta nuevas ideas. La tecnología que debe emerger no puede seguir una aproximación descendente y requerirá, por tanto, una forma alternativa de pensar y un nuevo entorno para desarrollar ideas y conocimientos científicos. Ése es el ámbito en el que surge «lo nano», como una necesidad de desarrollar una nueva tecnología que nos permita seguir progresando.

2.4. La revolución «nano»

Muchas definiciones circulan por la web para nanociencia y nanotecnología que, como todo lo que aparece en Internet, deben ser interpretadas con cautela. Hay quien dice que nanociencia es la ciencia de lo infinitamente pequeño. Esto no es estrictamente cierto, ya que esta definición responde mejor, por ejemplo, al tipo de estudios de los que se ocupa la física de altas energías, que trabaja con protones, neutrones o incluso con los constituyentes de éstos: los quarks. Otras personas piensan que la nanotecnología trata de reducir el tamaño de los objetos hasta límites insospechados. Veremos que esto tampoco es completamente acertado, ya que muchos de sus productos son materiales macroscópicos pero que disponen de una estructura nanométrica en su interior. Finalmente, a veces se asocia la palabra nanotecnología con la construcción de dispositivos y robots como los que tenemos en nuestro mundo pero de dimensiones muy pequeñas. Esto, como veremos a lo largo del libro, también es un error.

No ayuda mucho a establecer una definición de nanotecnología el hecho de que actualmente en el mundo científico y en el comercial hay un abuso del prefijo «nano». Hoy en día, convenientemente añadido a un producto lo convierte en algo novedoso y que parece haber sido perfeccionado en punteros laboratorios de investigación y, por tanto, se entiende como un símbolo de calidad o una etiqueta de impacto en prensa o televisión. Recientemente una página publicitaria de una empresa fabricante de champú avalaba la calidad de sus ensayos basándose en que «habían utilizado una nueva manera de ver cómo es el cabello, en concreto un microscopio de fuerza atómica (AFM) que utiliza la NASA». Obviamente, que la NASA utilice este tipo de microscopios en la Tierra o en Marte no tiene nada que ver con que este mismo instrumento pueda emplearse para estudiar los cabellos humanos, o en cualquier caso que ésta sea la mejor forma de hacerlo. Y aunque lo fuese, no garantiza en absoluto que su champú sea mejor que el de la competencia. Esta moda de «lo nano» no solo se limita a la publicidad más o menos engañosa de algunas empresas. También afecta al mundo científico. Los gestores de la política científica ven en la nanotecnología un faro hacia donde dirigir los esfuerzos de la comunidad investigadora mediante financiación y programas internacionales. Consecuentemente, muchas veces el científico busca subvenciones para continuar su trabajo, que cada vez son más difíciles de obtener, disfrazando o sesgando sus investigaciones hacia áreas relacionadas con la nanociencia.

Otro de los problemas con el que nos encontramos a la hora de ofrecer una

definición de estos términos está relacionado con el hecho de que ni la nanociencia ni la nanotecnología nacieron como disciplinas cerradas, sino como campos del conocimiento que se han ido construyendo paralelamente a la aparición de nuevos descubrimientos y que, de hecho, no sabemos hacia dónde derivarán.

Con todo lo que llevamos dicho, ya podemos acercarnos a una verdadera definición del objeto de este libro. De manera general, se podría definir nanotecnología como la fabricación de materiales, estructuras, dispositivos y sistemas funcionales a través del control y ensamblado de la materia a la escala del nanómetro (de 0,1 a 100 nanómetros, desde el átomo hasta una décima parte de una bacteria), así como la aplicación de nuevos conceptos y propiedades (físicas, químicas, biológicas, mecánicas, eléctricas...) que surgen como consecuencia de esa escala tan reducida.

En cualquier caso, conviene dejar claro que para que un concepto o material se pueda considerar relacionado con la nanociencia no basta con que tenga dimensiones nanométricas. Si sólo fuese eso, toda la química sería nanotecnología. ¿No han intentado los químicos comprender y trabajar con átomos desde que Dalton postulase su existencia en 1808? La diferencia reside en la forma en la que se manejan los objetos y en las nuevas propiedades que emergen de su reducido tamaño. Mientras que la química ha trabajado tradicionalmente desde un punto de vista macroscópico y global (por ejemplo, siguiendo las reacciones en las que participan todas las moléculas presentes en un tubo de ensayo mediante cambios en el color, temperatura o pH), la nanociencia sigue estos procesos a una escala atómica o molecular, pero de manera individual: entendiendo, manipulando y actuando sobre una molécula concreta (o un átomo, una nanopartícula, una proteína, etc.) y estudiando la manera de agruparlas de forma ascendente. Todo está formado por átomos y moléculas y no por eso todo es objeto de estudio exclusivo de la física o la química. La nanotecnología implica la formación de estructuras con nuevas propiedades, así como el control atómico o molecular sobre ellas. Por ejemplo, el tubo de escape de un coche no debe considerarse como una nanoherramienta para producir nanopartículas porque aunque, por desgracia para el medioambiente, produzca cantidades ingentes de ellas, lo consigue a través de un proceso químico descontrolado, generándolas con una gran variedad de tamaños y composiciones.

Así pues, conviene recalcar que para que un producto esté verdaderamente relacionado con la nanotecnología, no sólo el tamaño importa, sino que debe darse al menos alguna de estas condiciones: la reducción de escala ha de ir acompañada por la emergencia de nuevas propiedades (físicas, electrónicas, de origen cuántico, de tamaño finito), el material debe haberse fabricado mediante técnicas ascendentes o haber sido manipulado en su escala atómica o molecular de manera individual y precisa. Existen

muchos materiales que cambian sus propiedades con el tamaño. Un ejemplo puede ser el oro que, al pasar de ser un material macroscópico a tener el tamaño de una nanopartícula, cambia de color: deja de tener su característico tono amarillo para volverse azulado (en nanopartículas de unos 100 nm) o rojizo (si éstas son de 10 nm). Esta propiedad puede utilizarse para construir nuevos dispositivos ópticos que de una manera simple (mirando el color o midiendo su espectro de absorción) nos indiquen si se ha producido, o no, un determinado proceso (Figura 2.5), o también para fabricar tintes o pinturas a partir de un único material.

La aproximación «nano» es, por tanto, muy diferente de la «descendente», pues el planteamiento está basado exactamente en lo contrario: ir de lo pequeño a lo grande, fabricando dispositivos o nuevas estructuras a partir de sus componentes últimos. En este caso, se trata de trabajar no como un escultor, sino como un albañil, que construye una pared partiendo de una serie de elementos básicos, los ladrillos. Esta aproximación, que se conoce como «ascendente» o *bottom-up* (de abajo hacia arriba), utiliza para construir los diferentes objetos, componentes básicos muy variados tales como átomos, moléculas, ácidos nucleicos, proteínas, nanopartículas, nanotubos, etc. Es algo similar a montar un puzle, en el que encajando cientos de piezas de diferentes tamaños y colores podemos construir casas, aviones, o robots. Si las piezas de nuestro pasatiempo, en lugar de ser de cartón o de plástico, fuesen bolas de 0,1 nm de diámetro, y las llamásemos oxígeno, hidrógeno o carbono, podríamos ensamblar una molécula de agua o de glucosa como construíamos castillos cuando éramos pequeños. Pensar que podríamos desarrollar toda la tecnología que nos rodea fabricando el objeto que deseamos molécula a molécula, o partícula a partícula, parece un sueño atractivo pero irrealizable. No sabemos cómo manipular cada una de las piezas del lego, no sabemos cómo hacer para que éstas se unan entre sí, ni qué tipo de pegamento utilizar. Y aunque lo lográsemos, ¿cuánto tardaríamos en construir un nanobjeto?, ¿tendrían estas nanoestructuras alguna utilidad?

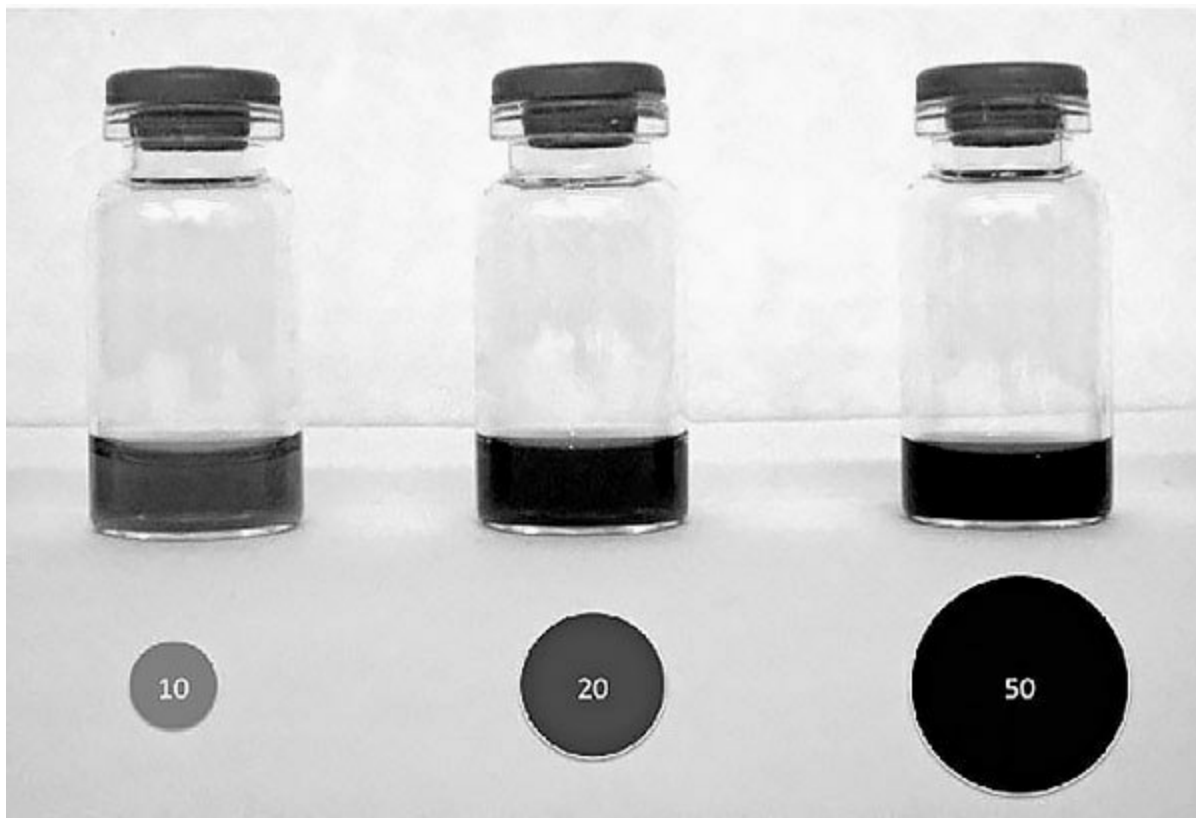


FIGURA 2.5. Las propiedades de algunos materiales, como su color, dependen de su tamaño. En la foto vemos disoluciones de nanopartículas de oro de distintos tamaños, indicados en los círculos en nm. Los distintos tonos de gris corresponden a colores diferentes en la imagen original. Gentileza de la Dra. Puerto Morales, ICMM-CSIC.

No obstante, si meditamos sobre estos interrogantes veremos que esta idea no es tan descabellada. Para comprender cómo se pueden construir dispositivos de orden superior partiendo de sus constituyentes fundamentales sólo tenemos que mirar a nuestro alrededor. Comprobaremos que la biología lo viene haciendo desde hace casi 4000 millones de años sobre la Tierra. De hecho, la vida es el único sistema complejo y autorrelacionado que funciona utilizando las ideas propias de la nanotecnología. Así, las moléculas que se sintetizaron antes de que la vida apareciera sobre la Tierra se fueron reconociendo, enlazando y autoensamblando para formar estructuras de mayor complejidad que les proporcionaban ciertas ventajas para captar energía, evitar su degradación, hacer copias de sí mismas y evolucionar. Por ejemplo, simplificando mucho se puede decir que, en el mundo anterior a las células, moléculas relativamente simples como los nucleótidos se fueron uniendo entre sí de manera precisa hasta construir los ácidos nucleicos (el ácido ribonucleico o ARN y posteriormente el ácido desoxirribonucleico o ADN), y algo parecido ocurrió con los aminoácidos que formaron las proteínas. Pero no sólo se trata de la aparición de la vida, también de lo que está pasando en la biología actual. Por ejemplo, en el momento en que un ser humano es engendrado, no es más que la unión de dos células individuales, el llamado

cigoto, pero poco tiempo después y a través de sucesivas divisiones, su tamaño va aumentando hasta formar primero un embrión, luego un feto y después una persona independiente. Además ahora mismo, en el interior de cada una de nuestras células, hay una actividad frenética para metabolizar los nutrientes y ensamblar macromoléculas siguiendo las órdenes que dictan nuestros genes. En estos procesos intervienen nanomáquinas naturales tan importantes como los ribosomas o distintos tipos de bionanomotores, de los que hablaremos en detalle en el Capítulo 7. Los ribosomas, por ejemplo, son agregados de macromoléculas de unos 30 nm de diámetro, que fabrican nuevas proteínas a partir de sus aminoácidos constituyentes siguiendo la programación que se encuentra escrita en el ARN. Otro ejemplo lo encontramos en la kinesina, una proteína que transporta material moviéndose por el interior de la célula sobre unos microtúbulos, como si fuera un acróbata que camina sobre un cable, dando pequeños pasos de un nanómetro de largo. Es un pequeño motor molecular que utiliza energía química para desarrollar un trabajo.

Toda la diversidad de los seres vivos está generada combinando unos pocos tipos de átomos. Lo importante es colocarlos de una manera determinada. Por tanto, imaginemos que quisiéramos emular a la vida y construir un organismo vivo en el laboratorio. Lo más difícil no sería escoger los ingredientes adecuados. Por ejemplo, para fabricar un cuerpo humano se necesita disponer de 60 kg de agua, 20 kg de aminoácidos, unos pocos kilogramos de azúcares, lípidos y otras moléculas orgánicas, y unos 300 gramos de iones como sodio, potasio o hierro. En total, podríamos comprar todos los constituyentes moleculares de un ser humano por unos 1200 euros. El problema reside en saber cómo ensamblar cada uno de los átomos y moléculas que forman una persona o, más sencillo todavía, en cómo fabricar una primera célula gameto colocando sus constituyentes moleculares de la forma adecuada, a semejanza de un enorme puzzle en el que cada pieza es una molécula. Ahora bien, si quisiésemos ponernos manos a la obra, enseguida nos encontraríamos con al menos dos dificultades. La primera, que son muchas las piezas que debemos ensamblar y la segunda, que no disponemos de herramientas que nos permitan manipularlas en tiempos razonables. Éstas son dos de las limitaciones que, mediante el uso de nuevas metodologías de fabricación ascendente (*bottom-up*), tenemos que superar para que la nanotecnología funcione, incluso con objetivos mucho menos ambiciosos que sintetizar un ser vivo molécula a molécula.

2.5. Seis preceptos para hacer el camino

Para conseguir ensamblar sistemas complejos, como podría ser un nuevo tipo de transistor fabricado con moléculas orgánicas, necesitamos primero entender cómo funcionan las moléculas en el mundo nanométrico: cuáles son las leyes de la naturaleza o los mecanismos físico-químicos relevantes por las que se rigen. Descubrirlos ha sido, y sigue siendo, trabajo de la nanociencia. Pero esto no acaba aquí. Una vez conseguido, tenemos que ser capaces de construir algo basado en ese conocimiento, es decir, avanzar hacia la nanotecnología. Para que la revolución «nano» pueda acontecer, las ideas deben atravesar la barrera del tamaño. El verdadero reto es traducir toda esa información que la ciencia nos suministra sobre la nanoescala, a 10^{-9} metros, para construir una tecnología que funcione en nuestro mundo métrico. Ahora podemos ver más clara la diferencia entre nanociencia y nanotecnología. La primera nos enseña cómo funciona el mundo «allá abajo» y la segunda nos permite construir aparatos u objetos que tengan nuestro tamaño y puedan interactuar con nosotros «aquí arriba». Esta idea es tan fascinante que la ciencia ficción se ha apoderado del campo hace ya muchos años, sugiriendo un sinfín de nuevas e imaginativas posibilidades; un mundo lleno de nanorrobots, nanomáquinas, nanodispositivos o nanosubmarinos propuestos desde la ingeniería y que muy probablemente no existirán nunca. Por desgracia, como se comenta en el Capítulo 8, estos objetos soñados por los autores de novelas, películas, cómics y videojuegos se han convertido en la imagen más extendida que la sociedad tiene sobre la nanotecnología.

La verdadera estrategia para que se pueda desarrollar nanotecnología a partir de los descubrimientos básicos de la nanociencia emana de un conocimiento profundo de las leyes de la física y la química. Todavía no existen muchos procedimientos contrastados para ensamblar materiales o construir nuevos objetos desde sus componentes más elementales, pero algunas ideas de cómo y cuáles deben de ser estas estrategias están claras. Podemos exponerlas como un «sexálogo» de principios que nos permitan encontrar auténticas soluciones nanotecnológicas y que nos ayuden, por tanto, a pasar de la ciencia a la tecnología.

El primer precepto es construir de manera ascendente, es decir, uniendo de la manera adecuada cada uno de sus ladrillos constituyentes para formar el nanobjeto que busquemos fabricar, como ya hemos explicado. Un anexo de este precepto es evitar la construcción en serie. No podemos construir el puzle como lo haríamos nosotros, una pieza tras otra, pues una cadena de producción en serie a nivel molecular o atómico sería inabordable debido al elevado número de piezas. Así por ejemplo, para construir la Figura 1.1 que, recordemos, estaba formada por únicamente diez moléculas, se necesitaron dos horas, y eso una vez que todo el experimento estaba ya optimizado. Si consiguiésemos ser muy eficientes y tardásemos, por ejemplo, un segundo por molécula,

tardaríamos once días completos para colocar un millón de ellas, que todavía son muy pocas si lo que se desea es construir un dispositivo. Una estrategia alternativa, y mucho más inteligente, sería utilizar las leyes químicas, intrínsecas a las propias moléculas, para que ellas mismas hagan el trabajo y se autoordenen o autoensamblen sin nuestra intervención directa, aunque de la forma que nosotros deseemos.

El segundo precepto es el de la cooperación y está basado en la unión de los esfuerzos individuales de cada nanodispositivo para generar un efecto resultante global. Recordemos que el producto final generado debe funcionar en nuestro mundo macroscópico. Imaginemos que conseguimos colocar sobre una superficie unas moléculas capaces de rotar a modo de motores o engranajes dentados. La fuerza individual de cada una de ellas sería pequeñísima y por tanto inútil en nuestro mundo. Otro ejemplo, los cuellos de algunos virus son nanomotores moleculares que utilizan éstos para empaquetar el genoma ejerciendo fuerzas del orden de piconewtons. Estas fuerzas son muy elevadas en el mundo «nano», pero resultan insignificantes en el nuestro. Sólo si lográsemos disponer de millones de estos motores trabajando colectivamente y de la misma manera, al unísono, sus esfuerzos se sumarían y podríamos disponer de máquinas operativas en nuestro mundo. Tales movimientos colectivos o, mejor, cooperativos, son un concepto importante que muy pocas veces es discutido en los trabajos publicados por los especialistas en este campo. Este precepto está relacionado con la necesidad de conocer los métodos de integración e interconexión de nanodispositivos en estructuras de mayor tamaño.

El tercero de los preceptos para trabajar en nanotecnología es el de la simplicidad. En efecto, buscar estrategias muy complejas para crear nuevos dispositivos es inoperante y normalmente estos diseños no dan resultado. Lo ideal es simplificar el problema y quedarnos con lo verdaderamente esencial, con las leyes mínimas necesarias para que funcione. En este sentido, observar la naturaleza también supone una ayuda y fuente de inspiración.

El cuarto precepto es el de la originalidad. Es decir, hemos de buscar soluciones diferentes, evitando copiar ideas que ya existen en nuestro mundo macroscópico, simplemente reduciendo sus dimensiones hasta el tamaño nanométrico. Una aproximación desde la ingeniería consistiría en pensar que podemos fabricar robots como los que existen en las películas de ciencia ficción, pero de tamaño pequeñísimo. Este planteamiento se olvida de uno de los principios fundamentales de la propia ingeniería: el volumen de un objeto escala con su longitud elevada al cubo y la superficie con la longitud al cuadrado. Veamos un par de ejemplos tomados de la biología, donde se conoce como «alometría» al conjunto de leyes que estudian los cambios de dimensión relativa de las partes corporales de un ser vivo en relación con

los cambios en su tamaño total. ¿Una hormiga tendría la misma forma si su cuerpo midiese un metro en lugar de un centímetro? Sin duda su morfología sería muy distinta ya que, por ejemplo, necesitaría disponer de unas patas que soportasen el enorme aumento de su peso. ¿Podríamos encontrarnos con un gorila del tamaño de King Kong? Evidentemente no, entre otras cosas porque moriría colapsado por su peso y además se asfixiaría ya que sus pulmones no tendrían capacidad suficiente para enviar aire a todo su cuerpo. Volviendo al ámbito de los materiales, hay magnitudes que dependen de su volumen (como el peso o la resistencia mecánica) y otras de la superficie (como el transporte eléctrico) y, por tanto, no podemos escalar directamente un objeto y esperar que funcione como el original. Por ejemplo, si quisiéramos transportar medicinas por la sangre, no deberíamos construir un nanosubmarino utilizando el mismo tipo de piezas e instrumentación que en el mundo macroscópico, aunque pudiéramos reducirlas hasta el tamaño deseado. Además de contradecir los preceptos primero y tercero que acabamos de plantear, dicho nanosubmarino no aguantaría la presión a la que estaría sometido en el torrente sanguíneo. La solución debe ser completamente distinta a la que nos mostró el cine en la película *Viaje alucinante*. Por ejemplo, podríamos recubrir una nanopartícula con biomoléculas para que el organismo no la identifique como intrusa y, a la vez, hacer que transporte un medicamento en su superficie. O bien utilizaríamos la cápsida de un virus, desprovisto de su genoma, como nanotransportador. Estas soluciones son mucho más simples y económicas, y es más probable que den buen resultado, como de hecho ya se está comprobando.

El quinto precepto es la interdisciplinariedad. La nanotecnología requiere el uso de una nueva y muy compleja instrumentación y, por tanto, la necesidad de combinar expertos en distintas técnicas y áreas científico-técnicas. Hoy en día la división vertical del conocimiento en disciplinas compartimentadas (como la física, la química, la biología o la ingeniería) está llegando a su fin y se debe tender a una formación horizontal e interdisciplinar. Pongamos como ejemplo un biólogo que quiere construir un motor molecular basándose en el que poseen algunos virus. Para ello, deberá conocer técnicas de imagen y manipulación propias de la física, y también entender las interacciones moleculares que rigen la química del sistema. Finalmente, para construir un dispositivo funcional tendrá que manejar conceptos de ingeniería. Así pues, el desarrollo de la nanotecnología requiere no sólo la utilización de técnicas de fabricación, visualización y caracterización muy precisas, sino también una aproximación multidisciplinar que reúna a físicos, químicos, biólogos, tecnólogos y teóricos trabajando juntos y utilizando el mismo lenguaje. De esta manera el nanotecnólogo deberá, en cierto modo, comportarse como un hombre del Renacimiento, que no sólo dibujaba o pintaba, también escribía novelas, ensayos o diseñaba nuevos

aparatos. Sin embargo, y a diferencia de lo que ocurría en aquella época, hoy en día el grado de especialización para fabricar dispositivos nanotecnológicos es tan elevado que resulta muy difícil aunar en una misma persona las nociones científico-técnicas de varias áreas del conocimiento que son necesarias. Este problema puede soslayarse formando equipos de trabajo interdisciplinarios, donde los conocimientos de una persona se complementen con los de otra.

El sexto y último precepto, ya comentado con anterioridad, es la observación de la naturaleza. Se ha dicho en muchas ocasiones que la vida es la musa de la nanotecnología, pues es el único sistema conocido que funciona utilizando exclusivamente los preceptos de ésta. Existen muchos ejemplos de cómo imitar a la naturaleza para producir nuevos dispositivos, como podrían ser los motores moleculares. Para ello podríamos fijarnos en la kinesina, una molécula que, como ya hemos visto, transporta macromoléculas desde un punto a otro de la célula dando pequeños «pasos» nanométricos sobre un microtúbulo (ver Figura 6.6). Esos pasos se realizan transformando la energía química que se libera al degradar una molécula llamada ATP, en energía mecánica.

No obstante, conviene hacer una precisión importante a este precepto. La biología ha optimizado el camino para construir seres vivos desde planteamientos que podemos considerar nanotecnológicos después de miles de millones de años de evolución. Para encontrarlo ha probado cientos de miles de rutas posibles mediante el método de prueba y error, sin un diseño previo ni una finalidad preestablecida. Los resultados de esa diversidad de soluciones se han ido adaptando, por selección natural, a las condiciones ambientales concretas. Muchas de ellas no han funcionado y por tanto se han extinguido, mientras que otras han perdurado y evolucionado. Pero, como hemos apuntado, esta solución no tiene por qué ser única. La evolución podría haber seguido muchas trayectorias alternativas, aunque sabemos que los seres vivos que constituyen la biodiversidad que nos rodea están aquí porque «funcionan suficientemente bien». Puede que haya otras que, aunque nunca se hayan explorado ni optimizado, sean viables. Nosotros, aunque nos inspiremos en las soluciones naturales, podemos explorar rutas diferentes a las existentes que nos permitan construir otro tipo de dispositivos. Solo tenemos que mantener la mente suficientemente abierta como para saber encontrarlas.

Una vez repasados estos seis preceptos, es evidente que a día de hoy tenemos muy pocos ejemplos (o quizá ninguno) de nueva tecnología que funcione siguiéndolos todos a la vez. Las aplicaciones disponibles utilizan alguna de estas ideas pero estamos todavía lejos de poder construir tecnología sofisticada basada exclusivamente en estos principios. Tal vez el campo donde más se apliquen sea en temas relacionados con la salud y la medicina, donde actualmente se están probando nuevas terapias basadas en

nanotecnología y, por tanto, estarán disponibles para la sociedad en algo menos de diez años. La transición desde la nanociencia a la nanotecnología es un campo abierto y fascinante, que constituye una de las áreas de estudio más atractivas para jóvenes motivados.

Una pregunta que nos hacemos para finalizar este apartado es si estarán listas las administraciones, instituciones y empresas para implementar y valorar las actuaciones que requiere la implantación de la nanotecnología. Por ejemplo, el precepto de interdisciplinariedad choca de frente con la formación tan especializada que se imparte en nuestras universidades, así como con el encajonamiento de los proyectos de investigación. Un proyecto en la frontera entre la física y la biología es normalmente mal evaluado por ambas áreas y, de igual manera, proyectos a largo plazo o de riesgo elevado por la novedad de las ideas son difícilmente financiados ya que se catalogan como sueños irrealizables. El lector podrá comprobar dentro de diez años si las administraciones dentro y fuera de España han ayudado a dar el paso desde la nanociencia a la nanotecnología y si los científicos han tenido la valentía e imaginación para dar ese salto. Por otra parte, no podemos olvidar que la mayor parte de los métodos de fabricación que se utilizan en las empresas son aún descendentes y existe un inercia natural para seguir usándolos. El paso hacia aproximaciones más radicales, como podría ser la implementación de mecanismos de autoensamblado o ascendentes, son difíciles de introducir en los procesos de producción. Nuevamente se requiere valentía y alto riesgo, pero esta vez desde el ámbito empresarial.

2.6. Las bases del mundo «nano»: el pasado

La nanotecnología no es una disciplina cerrada que haya sido postulada por uno o varios científicos en un momento dado. Es más bien el resultado de un cúmulo de ideas y conceptos que han surgido a lo largo del último siglo y se han ido perfilando principalmente durante las dos últimas décadas. Esto hace que su historia sea tan apasionante como difícil de contar.

Podríamos decir que la historia del mundo «nano» comienza con el modelo atómico y la mecánica cuántica, otra verdadera revolución sobre el conocimiento de la materia. Fue en esa época, en los años veinte, cuando se sentaron las bases para describir los átomos y moléculas, los ladrillos de la nanotecnología. Sin embargo, parece demasiado oportunista remontarse tan atrás en el tiempo y, por tanto, situaremos el origen de la nanociencia en el momento en que se comenzaron a discutir las ideas de fabricación ascendente.

Parece claro que la primera persona que habló de fabricación ascendente, «uniendo ladrillo a ladrillo», y por tanto de la nanotecnología tal como la entendemos hoy en día (aunque sin pronunciar esta palabra) fue Richard Feynman, científico norteamericano que ganó el Premio Nobel de Física en 1965 por sus aportaciones a la física de partículas, un campo que no tiene nada que ver con la nanotecnología. Feynman tuvo una vida profesional y personal muy variada: participó en el proyecto Manhattan para la construcción de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial, fue un gran divulgador de la ciencia, y casi al final de su vida formó parte de la comisión para la investigación del accidente del transbordador espacial *Challenger*. Fue en 1959, años antes de ganar el Premio Nobel, cuando pronunció una conferencia en el Instituto de Tecnología de California que versó sobre el problema de la manipulación de objetos a pequeña escala. En ella afirmó que podría haber muchas oportunidades tecnológicas «jugando» con átomos y moléculas. Concluyó que no había ninguna ley física que lo prohibiese y que, por tanto, conseguirlo era solo una cuestión de tiempo, el necesario para que se inventasen las herramientas adecuadas. De él es la famosa frase que se utiliza habitualmente como un símbolo de la nanotecnología: «*there is plenty of room at the bottom*» («hay mucho espacio libre al fondo»). En aquel momento su discurso no tuvo una gran repercusión, pero hoy en día resulta asombroso comprobar cómo se han cumplido sus predicciones.

Sin embargo, Feynman no trabajó nunca en esta nueva disciplina, ni siquiera conoció su nombre, ya que el término «nanotecnología» lo introdujo por primera vez el profesor N. Taniguchi de la Universidad de Ciencia de Tokio en un artículo titulado «*On the Basic Concept of "Nanotechnology"*» en 1974, que se presentó en una conferencia de la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Precisión. En dicho artículo se hablaba de la nanotecnología como la tecnología que nos permitiría separar, consolidar y deformar materiales átomo a átomo o molécula a molécula.

Estas ideas fueron publicadas a mediados de los años setenta pero nadie pensó cómo podrían materializarse, es decir, de qué forma podría construirse algún material o dispositivo desde sus constituyentes más elementales. Se requirió más de una década para que en 1986 Eric Drexler publicase un libro titulado *Engines of Creation* en el que describía cómo las nanomáquinas podrían ser capaces de construir, de manera autónoma, desde ordenadores hasta maquinaria pesada, ensamblando molécula a molécula. Para Drexler los encargados de realizar esa labor de montaje serían nanorrobots ensambladores, con un funcionamiento parecido al que desde siempre han realizado los ribosomas y otros agregados moleculares en las células de nuestro cuerpo. Estos nanorrobots, además, serían capaces de construirse a sí mismos y autorepararse cuando fuese necesario. La descripción realizada por Drexler se

corresponde con el funcionamiento de los motores moleculares, en los que la naturaleza ha generado un engranaje de moléculas de manera tal que unas hacen moverse a otras, lográndose un verdadero efecto mecánico. Drexler también vislumbró la posibilidad de desarrollar nanosubmarinos que podrían desplazarse por las venas buscando antígenos, como hacen los leucocitos.

Esta visión mecánica de la nanotecnología, en la que los nanorrobots ensambladores moleculares son los encargados de crear nuevos dispositivos a partir de átomos y moléculas, fue duramente rebatida por R. E. Smalley, científico conocido por el descubrimiento de una importante molécula en nanociencia, el fullereno, lo que le valió el Premio Nobel de Química en 1996. En el año 2001 Smalley publicó un artículo en la revista *Scientific American* (en España, *Investigación y Ciencia*, septiembre 2001) titulado «Química, amor y nanorrobots» («*Of Chemistry, Love and Nanobots*») en el que acusaba a Drexler de proponer modelos incompatibles con las leyes fundamentales de la química. Además, le culpaba de generar un ambiente apocalíptico que podía predisponer al gran público contra el nacimiento real de la nanotecnología. Este último punto se ha cumplido pues, como indicábamos en el Capítulo 1, personajes tan mediáticos como el príncipe Carlos de Inglaterra han alertado sobre un posible ataque futuro de nanorrobots descontrolados. Smalley criticaba las ideas de Drexler con un bonito ejemplo. Cuando dos personas se enamoran se suele decir que entre ellos hay buena química, pero para que surja el amor no basta simplemente con que ambos se pongan en contacto. Sin embargo, cuando ha surgido esta «química», la atracción es tan fuerte que no hay quién pueda separarlos. No les vale otra persona, tiene que ser el objeto de su amor y si pudiesen permanecerían juntos hasta el final. Esto mismo les pasaría a los átomos que constituyen el robot ensamblador: si quisiesen colocar a otros átomos para formar un dispositivo, bien los ignorarían, porque «no hay química», o bien se unirían a ellos en una reacción tan fuerte que los inutilizaría para continuar buscando o moviendo otros. Ésta es la teoría conocida con el nombre de «dedos pegajosos». La respuesta de Drexler no se hizo esperar y junto con otros nanotecnólogos como R. Freitas contraatacó a Smalley, haciéndole saber que los ribosomas hacen este mismo trabajo y no sufren la enfermedad de los «dedos pegajosos». Este debate siguió en varios medios y revistas científicas mediante el intercambio de cartas abiertas y no acabó con un vencedor claro.

Hoy en día, con el tiempo, el punto de vista de los científicos que trabajan en el tema es más cercano al de Smalley que al de Drexler. Por nuestra parte, podríamos argumentar que los engranajes ensambladores moleculares de Drexler no cumplen con casi ninguno de los preceptos expuestos en el apartado anterior. Ni son simples, ni trabajan de forma colectiva y, además, son una copia a escala reducida de los motores

actuales. En definitiva, a través de las páginas de *Engines of Creation*, nos hace soñar con objetos imaginados, de la misma manera que Julio Verne hizo soñar a nuestros abuelos con viajes a la Luna o al centro de la Tierra. El hombre finalmente pisó la Luna pero nunca llegó (ni llegará) al centro de la Tierra. De igual manera, es muy probable que casi ninguno de los objetos descritos y patentados por Drexler entren a formar parte de nuestras vidas y pasarán a la historia como una mera imaginación o especulación.

Sin embargo, el verdadero valor de los trabajos de Drexler fue el de proporcionarnos imágenes mentales del nanomundo, aunque hasta entonces seguía sin haber forma de acercarse a él. En el mismo año que Drexler publicó su libro, 1986, dos investigadores, G. Binnig y H. Rohrer, de los que hablamos al principio de este capítulo, recibieron el Premio Nobel de Física por la invención del llamado microscopio de efecto túnel (STM, del inglés *Scanning Tunneling Microscope*), una herramienta simple que nos permitió ver realmente cómo eran los objetos en la nanoescala. También en este mismo año surgió una variante del STM bautizada como microscopio de fuerzas atómicas (AFM, del inglés, *Atomic Force Microscope*). Estos dos tipos de microscopios supusieron una forma nueva de mirar al mundo nanométrico: habían nacido «los ojos de la nanotecnología». Estas técnicas, como se verá en el próximo capítulo, se basan en la suave interacción entre una punta afiladísima y una superficie. La punta, que puede llegar a acabar en un solo átomo, se «pasea» por encima de una superficie «sintiendo» sus átomos de forma similar a cuando se pasa un dedo por el teclado de un ordenador (ver Figura 2.6) o sobre un texto escrito en lenguaje Braille. STM y AFM, junto con alguna otra variante que surgió en los años noventa, se conocen hoy en día como microscopios de campo cercano (SPM, del inglés, *Scanning Probe Microscope*).

El trabajo con objetos tan pequeños entraña una gran dificultad y, de hecho, fue algo prácticamente imposible hasta que se desarrollaron los microscopios de campo cercano. Estas novedosas herramientas permiten hoy en día no sólo la visualización de moléculas, átomos u otros objetos de tamaño nanométrico, sino también su manipulación. Mediante su uso en determinadas condiciones podemos mover a nuestro antojo átomos, moléculas inorgánicas u orgánicas, proteínas, fragmentos de ADN, ribosomas, fullerenos, nanotubos, nanopartículas y un largo etcétera. Aunque quizá no parezca que ésta sea una labor tan asombrosa, tenemos que darnos cuenta de lo que significa en realidad ver o manipular entidades tan pequeñas como un átomo. Comenzábamos este capítulo con la inquietud y el asombro de un veterano investigador francés ante una técnica capaz de mostrarle cómo son realmente los átomos. De hecho, era común en los años ochenta, cuando se estudiaba bachillerato, que un profesor de física enseñara: «los átomos ni se ven, ni se podrán nunca llegar a ver». Para estos

profesores, ver un átomo suponía irradiarlo, bombardearlo con electrones, con fotones o con otros átomos. Por tanto, nunca sería posible ver un átomo en su estado natural, sino un átomo modificado por la interacción con las partículas (sondas) que se le envían. Sin embargo, no se imaginaban que mientras ellos explicaban física desde las aulas, otros científicos estaban desarrollando un tipo de microscopio que no necesita irradiar la materia, sino que simplemente detecta la nube de electrones que rodea a un material, gracias a una propiedad cuántica llamada «efecto túnel».



FIGURA 2.6. A la izquierda, analogía del funcionamiento de un microscopio de campo cercano o SPM: una afiladísima punta se pasea sobre una superficie sin prácticamente tocarla, como podemos hacer con el dedo sobre el teclado de un ordenador. A la derecha, fotografía obtenida con un microscopio electrónico de barrido de una punta de tungsteno utilizada para realizar imágenes con un STM.

Las microscopías de campo cercano se perfeccionaron enormemente durante los años noventa, junto con las técnicas de cálculo numérico, que permitían simular y comprender muchos de los experimentos que se realizaban en los laboratorios. En la última década del siglo XX y principios del XXI se dieron varios pasos importantes que perfilaron la nanociencia y nanotecnología como las conocemos hoy en día. En esta década se descubrieron los fullerenos, las nanopartículas, los nanotubos de carbono y el grafeno. Estos nuevos tipos de materiales despertaron un fervor inusitado ya que acercaban las ideas «nano» a las aplicaciones tecnológicas. Al mismo tiempo, las administraciones, conscientes de la potencialidad de esta nueva ciencia y de las posibles repercusiones en la sociedad, crearon algunos programas de investigación para fomentar los trabajos en nanociencia y nanotecnología, ayudando a convertir estas palabras en la realidad que son actualmente.

Por otra parte, hace algunos años comenzó a hablarse de bionanotecnología y

bionanomedicina, áreas que muy pronto se han convertido en campos muy pujantes dentro del mundo «nano». En gran parte, el auge es debido al fuerte desarrollo del AFM, técnica que permitió obtener imágenes de alta calidad del delicado material biológico en medio líquido. La estructura de bacterias, virus o biomoléculas cambia según el medio en el que se encuentren y en la mayor parte de los casos se deforma irremediablemente en el aire. Con esta herramienta es posible ver e interactuar con distintas estructuras biológicas dentro de su propio medio, lo que supone una gran ventaja respecto de los microscopios electrónicos, que son muy dañinos para la materia blanda y deben operar en condiciones de vacío.

Otro avance importante llevado a cabo durante los últimos años ha sido la mejora de las técnicas de fabricación y caracterización de materiales. Así, se han desarrollado grandes equipos de fabricación descendente de uso compartido, englobados en lo que se han llamado plataformas de usuarios. Estos equipos, aunque de tecnología descendente, han logrado producir haces de electrones o iones de pocos nanómetros de diámetro, que pueden ser utilizados, por ejemplo, para crear y visualizar estructuras donde posteriormente ensamblar, de manera ascendente, distintos nanobjetos.

En definitiva, desde que Feynman y Taniguchi sentaron las bases teóricas de la nanotecnología, ha habido un fuerte desarrollo experimental en los laboratorios. La combinación de técnicas de microscopía con nuevos sistemas de fabricación y de caracterización ha hecho que la síntesis y el uso de los materiales «nano» hayan crecido exponencialmente. Muchos centros de investigación han partido de estas ideas para diseñar no tanto dispositivos concretos, sino experimentos que demuestren las posibilidades para desarrollar esa «nueva» tecnología. Esto ha desembocado en la puesta a punto de diferentes programas de investigación, así como de diversas iniciativas para fomentar que los conocimientos generados por la ciencia tengan una traducción en la tecnología, y generen a corto plazo aplicaciones reales que puedan mejorar la calidad de vida de la sociedad. Algunas de ellas se describen en el apartado siguiente.

2.7. Áreas de estudio y aplicación: el presente

En las siguientes líneas, y a modo de breve resumen, expondremos algunas de las áreas de estudio y aplicación de la nanociencia y la nanotecnología que se desarrollarán en detalle en los capítulos siguientes. Sin embargo, debemos dejar claro que ninguna de estas áreas corresponde a un campo cerrado y muchas veces la clasificación es un tanto caprichosa o artificial. El «precepto» de interdisciplinariedad es particularmente

válido en este caso y hace que un mismo nanobjeto pueda estudiarse desde varias áreas de especialización. Un ejemplo de esta dificultad son las nanopartículas. Veremos que tanto los químicos como los físicos pueden fabricarlas (cada uno con unas herramientas diferentes) con una precisión asombrosa en su tamaño y forma. Los químicos y biólogos las usan como sensores, los médicos como elementos para la detección precoz de enfermedades o para diversas terapias y algunos ingenieros estudian su uso como materiales para el almacenamiento de información o para reforzar estructuras mecánicas. En cualquier caso, parece claro que el uso de las nanopartículas requerirá el esfuerzo combinado de científicos que las fabriquen, otros que definan su utilización en un dispositivo o en un entorno dado e ingenieros que finalmente escalen el proceso hacia una producción en masa. Otro ejemplo donde queda patente la interdisciplinariedad es el de los biosensores. Un diabético sería feliz si tuviese insertado un pequeño dispositivo que midiese de manera continua la concentración de glucosa en su sangre y que en caso necesario liberase la cantidad correspondiente de insulina. La fabricación de un dispositivo de estas características se consigue mediante la utilización combinada de distintas técnicas químicas que permiten inmovilizar sobre una superficie una biomolécula capaz de detectar la presencia de glucosa. Pero para operar con dicho biosensor necesitaremos utilizar métodos químico-físicos que nos permitan saber si la biomolécula depositada en la superficie no ha perdido su capacidad de reconocimiento de la glucosa durante el proceso de inmovilización sobre la superficie, técnicas bioquímicas para trabajar en medio biológico, herramientas de ingeniería para construir un dispositivo utilizable y biocompatible, y criterios médicos para probarlo en pacientes.

Veremos que el desarrollo de la nanotecnología ha venido de la mano de las nuevas «nanoherramientas» (Capítulo 3). Por ellas entendemos novedosas técnicas tanto de producción de nanobjetos como de caracterización de los mismos. Las altas prestaciones de las nuevas técnicas microscópicas para visualizar y manipular la materia, así como la potencia de las técnicas espectroscópicas y electroquímicas actuales para detectar pequeñas concentraciones de un determinado compuesto han sido clave para describir infinidad de procesos que ocurren en la nanoescala.

Los nuevos nanomateriales (Capítulo 4), entre los que destacan los basados en carbono, prometen numerosas aplicaciones en nuestra vida cotidiana y son una de las grandes promesas para el desarrollo de la nanotecnología. Estos materiales se han desarrollado para ser utilizados en muchos campos, entre ellos la electrónica, la mecánica o la medicina. Tal vez los más prometedores sean los nanotubos de carbono y el grafeno. Los primeros son tuberías formadas únicamente por átomos de carbono enlazados entre sí y que tienen un diámetro de pocos nanómetros. Su estructura es la de

un plano atómico de grafito (los átomos colocados formando hexágonos, como en un panal de abeja) enrollado sobre sí mismo. Estos tubos son seis veces más ligeros que el acero y cien veces más resistentes. Además, presentan propiedades semiconductoras o metálicas según cómo se hayan formado: si son tubos rectos presentan unas propiedades electrónicas y si están «retorcidos» (es decir, con una cierta forma helicoidal) poseen otras. Esta variedad de propiedades en un mismo material hace que se esté estudiando su uso tanto como elementos electrónicos (tipo diodos) o bien como pequeñísimos hilos conductores. Uno de los problemas que presentan para su aplicación tecnológica es la dificultad para seleccionarlos de manera controlada, de forma que todos tengan las mismas propiedades. Así, en muchos centros de investigación intentaban construir dispositivos electrónicos basados en nanotubos y para ello necesitaban que fuesen homogéneos, de la misma longitud y helicidad, y esto no parecía posible con las técnicas de síntesis disponibles en los años noventa. Para solventar este problema, en el prestigioso instituto americano de investigación *Laboratorio tecnológico de Georgia para nuevos materiales electrónicos* decidieron inhibir su helicidad desplegando los nanotubos en una banda formada por un solo plano atómico de carbono: una lámina de grafeno. Así, en el año 2001, este instituto comenzó a investigar sobre las propiedades electrónicas que presentan estrechas bandas bidimensionales de grafeno. De momento, todavía no se ha conseguido construir un dispositivo con las características necesarias para su comercialización, pero resulta curioso saber que el intento de construir nuevos dispositivos con nanotubos fue decisivo para el desarrollo del grafeno.

En nanoquímica (Capítulo 6) se estudian diversos procesos y mecanismos simples, como el reconocimiento molecular o la química supramolecular que, cumpliendo los preceptos que hemos descrito anteriormente, nos permiten construir nuevos tipos de nanoestructuras. Estos mecanismos se basan en utilizar las propiedades de las moléculas para que ellas mismas se organicen en estructuras más complejas capaces de desempeñar la función deseada. Por ejemplo, pueden fabricarse hoy en día láminas de moléculas orgánicas mediante autoensamblado que imiten los procesos de fotosíntesis de las plantas y desarrollar así hojas de plantas artificiales capaces de transformar la luz en energía. Sabemos que en un día soleado llegan millones de fotones por segundo a la superficie de cada hoja de un árbol y que esa energía solar se transforma en energía química gracias a una molécula llamada porfirina (contenida en la clorofila, el pigmento responsable del color verde de las hojas de las plantas). Pues bien, en un laboratorio estas porfirinas pueden colocarse en forma de láminas delgadas o microtubos para realizar un proceso de fotosíntesis artificial similar al que se produce en las plantas o en las algas verdes. Si consiguiésemos optimizar y escalar la fabricación de estos materiales podríamos disponer de un sistema nanotecnológico de producción de energía

que no generase contaminación. Una fuente que, nunca mejor dicho, podríamos calificar como «energía verde».

Sin duda, el campo en el que más esperanzas se han depositado es el de la nanobiotecnología y la nanomedicina (Capítulo 7), por el papel clave esta nueva tecnología podría desempeñar en la lucha contra enfermedades de difícil curación, como el cáncer. La importancia social que puede tener el uso de nanopartículas para detectar o eliminar tumores, el empleo de cáscaras de virus para transportar fármacos, el desarrollo de nuevos materiales que posibiliten implantes o la manipulación de ADN, ha ocasionado que muchos científicos vuelvan su mirada hacia este campo emergente. También se ha desarrollado mucho el campo de los biosensores y nanobiosensores, hasta llegar a niveles de integración que permiten incluso tener «un laboratorio dentro de un chip». Éstos son dispositivos de unos pocos milímetros que integran un chip capaz de analizar las concentraciones de diversos analitos como azúcares, proteínas o glóbulos rojos en volúmenes muy pequeños, del orden de unos pocos picolitros. Si llevásemos con nosotros uno de estos laboratorios portátiles, en poco tiempo podríamos hacernos un análisis completo con una simple gota de nuestra sangre. Sin embargo, a pesar de su popularidad entre los científicos, este campo sigue siendo uno de los más complejos ya que necesita la combinación de disciplinas muy diferentes. Suelen necesitarse físicos trabajando en equipo con químicos y médicos, y esta mezcla es verdaderamente difícil debido al uso de diferentes metodologías e incluso lenguajes científicos. Además, cuando la nanotecnología tiene aplicación en salud humana y farmacología debe trabajarse con un elevadísimo nivel de exigencia, disponiendo de protocolos claros de control. Ante el rigor que caracteriza el avance en estas disciplinas, resulta cuanto menos sorprendente cómo en el imaginario popular se vislumbra un futuro poblado por extraños nanosubmarinos y nanorrobots que, extraídos directamente de la ciencia ficción, se pretende que circulen por nuestras venas para curar enfermedades o convertirnos en superhumanos.

No obstante, el campo más conocido para el ciudadano y uno de los primeros que exploró la aproximación «nano» es el de la nanoelectrónica (Capítulo 5). Como ya hemos comentado, la tecnología actual ha seguido una ruta hacia la miniaturización que tarde o temprano llegará a su fin. El concepto de *bit*, la unidad de información, quiere reducirse lo más posible, hasta que sea tan pequeño como un átomo o una molécula individual. Además, han entrado en escena nuevos tipos de materiales que pretenden ser los sustitutos del silicio, hasta ahora el material por excelencia en el campo de la electrónica. El principal de ellos es el grafeno, que como hemos visto es una lámina bidimensional de átomos de carbono, con la que recientemente se han construido pantallas planas y los primeros prototipos de transistores. Hoy en día existe un gran

interés científico por estudiar este material, mejorar su síntesis y conocer mejor sus propiedades. Éste es un buen ejemplo de cómo ciencia y tecnología se han ido apoyando y complementando en los últimos años. En este campo cabe también destacar los materiales orgánicos, con los que se pretende aportar un nuevo tipo de compuestos fotosensibles para ser utilizados como captadores de luz solar o diodos altamente eficientes en un futuro cercano.

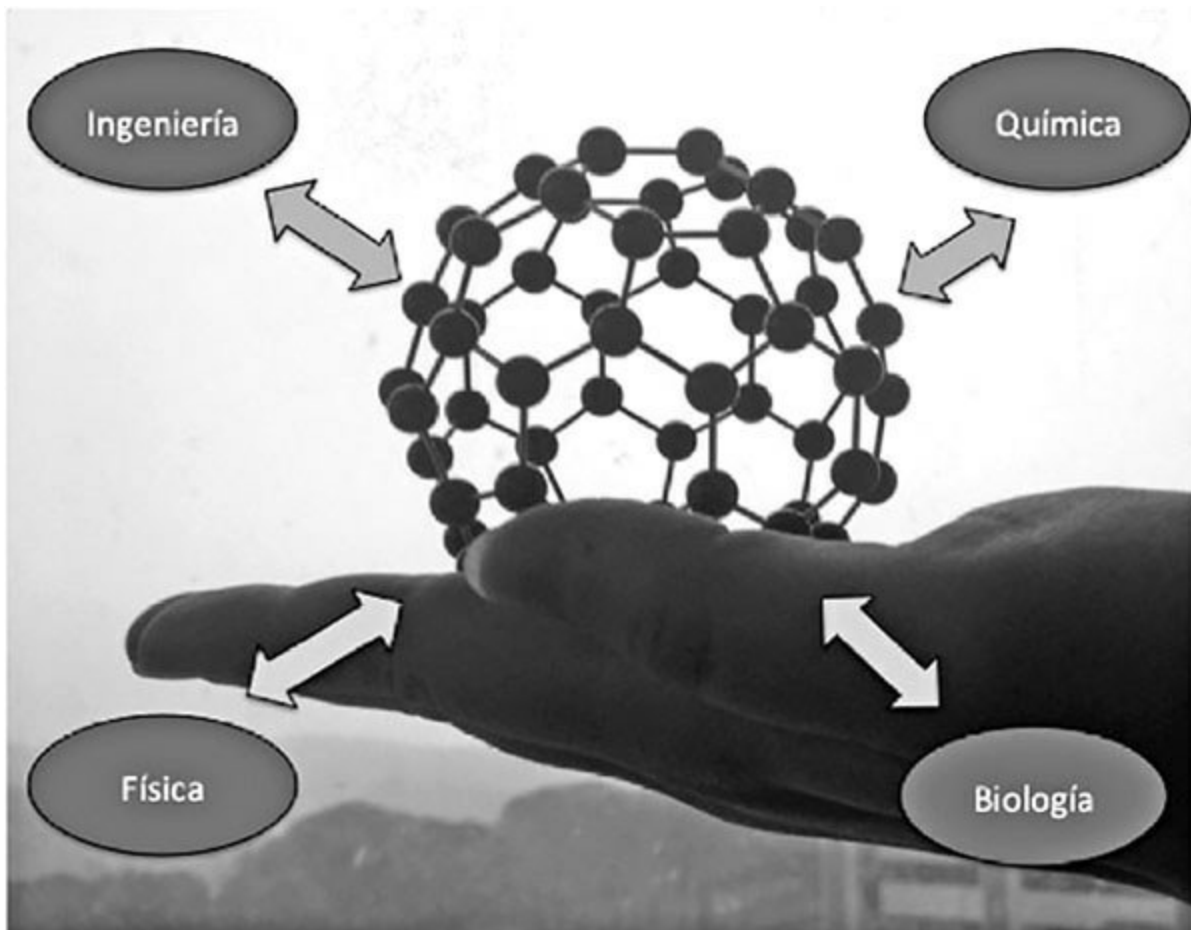


FIGURA 2.7. Sólo la combinación de diversas áreas del conocimiento podrá ayudarnos a tener el nanomundo en nuestras manos.

2.8. El camino hacia la tecnología: el futuro

La lista de campos en los que la nanotecnología intenta contribuir aportando nuevos dispositivos o materiales es muy amplia, y se extiende desde la aeronáutica hasta la cosmética pasando por ámbitos tan dispares como la construcción o la alimentación. Es, por tanto, difícil escribir sobre las aplicaciones de la nanotecnología sin quedar rápidamente desactualizado. Seguramente, antes de que se publique esta obra habrán

surgido nuevas aplicaciones o productos basados en los conocimientos sobre nanociencia que este libro expone. Además, existe otra dificultad adicional a la hora de referirnos a las aplicaciones. Como hemos indicado, se abusa sin pudor del prefijo «nano» pues muchos productos fabricados convencionalmente lo añaden a su nombre como un sello de calidad o modernidad. Por tanto estas aplicaciones, aunque catalogadas como nanotecnológicas, en realidad están muy lejos de pertenecer a este campo. En este apartado revisaremos brevemente algunos de los productos más prometedores que ya están o pronto estarán en los mercados. Es importante tener en cuenta que por aplicaciones no nos referimos al prototipo de fabricación, sino al producto final que el lector podría comprar, como se expondrá con más detalle en el Capítulo 8.

Las aplicaciones derivadas de los conceptos «nano» que están disponibles actualmente son aún muy simples (cremas solares, recubrimientos protectores, equipamiento deportivo...), y raras veces cumplen los preceptos que hemos expuesto anteriormente. De hecho muchos de estos productos ya existían anteriormente y ahora simplemente se les ha dado un nuevo enfoque mejorado o más atractivo. Este tipo de aplicaciones pueden clasificarse como aplicaciones pasivas y, en todas ellas, el material nanoestructurado es utilizado por sus propiedades físicas o mecánicas para mejorar las prestaciones de otros materiales convencionales. Por ejemplo, se empiezan a comercializar camisas fabricadas con tejidos hidrofóbicos, en las que el material textil tiene una nanoestructura que hace que no se moje bajo la lluvia, que el vino no la manche o que se pueda lavar más fácilmente. Otra de las aplicaciones pasivas de gran importancia tecnológica es la fabricación de recubrimientos duros y muy delgados que, convenientemente depositados sobre una herramienta, hacen que ésta mejore sus prestaciones y durabilidad.

Podemos esperar que aplicaciones como las que hemos indicado, en las que el elemento «nano» tiene un papel completamente pasivo, vayan dando paso a productos o materiales en los que el elemento «nano» sea cada vez más activo, como pueden ser nuevos tipos de biosensores más eficientes que incluyan nanopartículas. También en esta categoría entraría la fabricación de novedosos dispositivos electrónicos, tanto de almacenamiento de información como transistores más rápidos, o instrumentos que permitan captar la energía del sol de manera más eficiente. La evolución de sistemas pasivos a activos es el camino que se está recorriendo en la actualidad y será necesario al menos acabar la presente década para que algunos de estos nuevos productos se puedan encontrar en los mercados, de forma que la nueva tecnología se instale en la sociedad.

La siguiente etapa en la senda de la implantación de la nanotecnología consiste en

pasar de materiales activos a sistemas moleculares complejos, en los que se combinen varios de los que hemos denominado preceptos de la nanotecnología. Éste sería el tránsito más difícil, pero al mismo tiempo el que puede desembocar en una revolución tecnológica de mayor calado. Para dar este paso es necesario controlar las herramientas de autoensamblado de forma que nos permitan crear nuevas estructuras a medida. En este campo necesitaremos todavía más de quince años de estudio antes de conseguir los primeros prototipos de nuevos dispositivos que puedan trabajar en nuestro mundo.

Aunque al principio de este capítulo establecíamos una diferencia entre ciencia y tecnología y marcábamos una secuencia temporal entre ambas, es necesario precisar que hoy en día el tiempo que transcurre entre la aparición de un nuevo material en el laboratorio y su comercialización puede llegar a ser muy corto. Consideremos el ejemplo del grafeno, uno de los materiales más estudiados en la actualidad. Aunque su origen es natural y se conocía desde hacía varias décadas como un subproducto indeseado, fue en 2004 cuando se descubrió cómo aislarlo de manera efectiva. Se comprobó que era un material inerte, estable en aire y puramente bidimensional al estar formado por una sola lámina de átomos. Posteriormente, en el año 2010, el grupo de investigación que puso de manifiesto sus asombrosas propiedades electrónicas ganó el premio Nobel de física. En el año 2011, la empresa Samsung junto con otros grupos de investigación consiguieron un primer prototipo de una pantalla plana de grafeno de 30 pulgadas. IBM ya está investigando acerca de la formación de grafeno sobre carburo de silicio, como una forma de integrarlo fácilmente en las cadenas actuales de producción de dispositivos electrónicos. Éste es un ejemplo de la eficiencia y rapidez actual en la transferencia de conocimientos básicos al mundo tecnológico. Sin embargo, en otros sectores esta capacidad de tránsito desde el laboratorio a la producción se ve disminuida por la aplicación de una estricta normativa de seguridad que hace necesaria la realización de múltiples ensayos y controles, como ocurre en sanidad y alimentación.

Existen otros nanomateriales cuya utilización generalizada puede vislumbrarse en un futuro muy cercano. Uno de ellos son las nanopartículas, conglomerados de átomos que pueden usarse en diversos ambientes y presentan multitud de aplicaciones además de un coste muy reducido. Como hemos comentado, en el campo de la nanomedicina existen varias aplicaciones en fases avanzadas de estudio. A pesar de los problemas potenciales de toxicidad o de manipulación derivados de su pequeño tamaño, parece claro que seguirá aumentando su presencia en los mercados. Otro ejemplo son los nanotubos de carbono, que ya se utilizan como refuerzo para aplicaciones mecánicas y cada vez se avanza más en su uso en electrónica. Por último, podemos citar los materiales orgánicos para crear captadores eficientes de luz solar. Las primeras celdas solares basadas en este tipo de materiales comercializadas muy recientemente presentan

valores para su eficiencia similares a los obtenidos con celdas convencionales basadas en silicio.

Pero dejemos volar la imaginación para ir un poco más allá. Imaginemos las aplicaciones que existirán en 20 o 30 años derivadas de estos conceptos. Los cambios industriales más profundos que han tenido lugar en la historia han estado ligados a la convergencia de tecnologías. Cuando dos o más disciplinas científico-técnicas interactúan entre sí pueden producir una nueva tecnología que permite avanzar de forma más rápida que con la simple suma de conocimientos de cada una de ellas por separado. En estos casos se dice que se produce sinergia entre tecnologías. Por ejemplo, de la convergencia de la electrónica y las telecomunicaciones surgió el fenómeno de la sociedad de la información, la era digital, en la que todos estamos conectados e intercambiando información de forma instantánea y global. En estos momentos asistimos a un nuevo proceso de convergencia tecnológica en el que se están aglutinando conocimientos y metodologías que provienen de la nanotecnología, la biotecnología, las omnipresentes tecnologías de la información y telecomunicaciones, y las llamadas ciencias cognitivas incluyendo las neurociencias. Esta convergencia se ha denominado «convergencia NBIC», cuyas siglas se refieren a la combinación de los prefijos «Nano», «Bio», «Info» y «Cogno». En cada una de estas ramas científico-técnicas existen unas unidades de trabajo fundamentales que son bien conocidas: en el área «nano» las unidades de trabajo son los átomos y las moléculas, en el área «bio» las unidades son los genes y las proteínas, en el área «info» la unidad son los bits y, finalmente, las neuronas son las unidades básicas del área «cogno». Como vemos, la convergencia NBIC abarca parte del macro—, micro— y nanomundo.

El objetivo de la convergencia NBIC es producir nanobiodispositivos que incidan en nuestra salud, que nos permitan interactuar mejor entre nosotros o con nuestro entorno y que generen información con la que efectuar una adecuada toma de decisiones. Imaginemos por ejemplo que disponemos de pequeños dispositivos sensores que permiten hacer análisis y diagnósticos en tiempo real, proporcionándonos información sobre nuestro estado global (temperatura, tensión arterial, niveles de colesterol y de azúcar en la sangre, presencia de ciertos anticuerpos, recuento de glóbulos rojos y blancos, tensión ocular, etc). Dichos dispositivos podrían estar continuamente conectados con servicios médicos distantes que podrían realizar un mejor seguimiento y valoración del estado de salud de las personas. En algunos casos, los tratamientos basados en la dispensación controlada de fármacos nanoencapsulados podrían ser activados de forma remota. También se podrían fabricar nanomateriales con propiedades electromecánicas similares a las de las fibras musculares con los que mejorar la motricidad de las personas ya sea a través de su incorporación en la masa

muscular debilitada o mediante la fabricación de prendas de vestir que actúen como refuerzo externo de los músculos. Del mismo modo se fabricarían prótesis degradables e inteligentes capaces de regenerar tejidos óseos y nerviosos, proporcionándonos información sobre dicho proceso de generación y minimizando la posibilidad de rechazo y de infección. Estos tejidos y prótesis podrían permitir recuperar o mejorar la movilidad de personas que hayan sufrido traumatismos, lesiones de médula espinal o padezcan enfermedades neurodegenerativas. En cirugía se podrían emplear nuevos nanodispositivos (manipuladores, bisturís, microcámaras, sistemas de posicionamiento y de realidad virtual) que permitirían efectuar intervenciones quirúrgicas mucho menos agresivas y, si fuese necesario, de forma remota. Ahora todo esto parece ciencia ficción, pero algunas de estas ideas ya están siendo exploradas en laboratorios de centros de investigación y de hospitales. Sin duda queda un largo camino que recorrer, pero se está avanzando, poco a poco, hacia este mundo tan altamente tecnificado.

En cualquier caso, y volviendo al presente, cabe decir que la nanociencia, ya madura, está avanzando hacia la nanotecnología, aún adolescente, alumbrando aplicaciones reales que poco a poco se instalan en nuestro mundo. Este camino es largo y se está recorriendo quizá más despacio de lo previsto, pero parece que se dan pasos certeros hacia el establecimiento final de la nanotecnología como la tecnología que va a protagonizar el siglo XXI.

2.9. Implicaciones sociales

Aunque es muy difícil estimar el número de productos disponibles en el mercado basados en las ideas de la nanociencia y en los desarrollos de la nanotecnología (varios millares), está claro que el mundo de «lo nano» está teniendo desde hace años una gran repercusión mediática. Como comentábamos al comienzo de este capítulo, las imágenes del nanomundo producen el mismo tipo de fascinación que las que nos muestran la grandiosidad del universo. Sin embargo, entre ambas hay una diferencia fundamental. El universo es físicamente inalcanzable para los humanos (salvo algunos planetas y satélites que están en *nuestro vecindario* del Sistema Solar) y, por tanto, tenemos que conformarnos con observarlo mediante telescopios o analizarlo a distancia con técnicas espectroscópicas. Por el contrario, sí que podemos movernos en la nanoescala, llegar a ver y tocar los átomos y moléculas, combinarlos para producir nuevas estructuras y nuevos dispositivos. Dominar la materia en la nanoescala nos permite diseñar y fabricar nuevos materiales hasta ahora inexistentes, descubrir propiedades nunca

observadas, inventar instrumentos que nos permitan construir otros dispositivos de mayor complejidad que en el futuro quizá lleguen a comportarse como entidades biológicas e incluso muestren signos de inteligencia. ¿Hasta dónde podremos llegar? ¿Cómo puede esto cambiar nuestra forma de vida? Nadie es capaz de responder a estas preguntas de manera certera. Por eso la nanotecnología puede provocar cierta preocupación o incluso miedo en una sociedad que desconoce casi por completo muchos de los conceptos más básicos sobre ciencia y tecnología. Teniendo en cuenta la rapidez con la que los avances tecnológicos se incorporan en la sociedad, ¿debemos legislar sobre ello? En el Capítulo 8 de este libro hablaremos sobre todo ello, comentando los esfuerzos reguladores y divulgadores que se están realizando en distintos países, los nanoproductos que ya podemos encontrar a nuestro alrededor y la influencia que el mundo nano está teniendo en distintos campos de la cultura.

— 3 —

HERRAMIENTAS PARA CONSTRUIR EL NANOMUNDO

Los «años de aprendizaje» del STM se han acabado. Sus bases han sido establecidas, y los «años de viaje» han comenzado. No nos gustaría ser especulativos hacia dónde nos llevarán finalmente, pero creemos, de una manera honesta, que la belleza de las estructuras atómicas puede ser un estímulo para aplicar la técnica a esos problemas que serán exclusivamente de gran beneficio de la humanidad: la ilusión de Alfred Nobel y la de todos nosotros.

G. BINNIG y H. E. ROHRER, Discurso de la ceremonia de entrega del Premio Nobel, 8 de diciembre de 1986.

3.1. Necesidad de nueva instrumentación

La necesidad de construir herramientas ha existido desde el principio de la humanidad. El hombre primitivo golpeaba unas piedras contra otras para obtener lascas afiladas con las que cortar las pieles de los animales que cazaba. A través de la experiencia descubrió que unos guijarros eran más duros que otros y que según el tipo de piedra que utilizase podía obtener herramientas más o menos afiladas o quebradizas. Así, mediante un método experimental de prueba y error y con una idea clara de sus necesidades, que en ese momento estaban vinculadas a su supervivencia, fue conociendo las propiedades de las rocas de su entorno, perfeccionando las herramientas de corte e incluso fabricando utensilios que le permitían crear otros más afilados o con mejores capacidades. Anaxágoras, un filósofo griego que vivió en el siglo V a. C. dijo: «el hombre es inteligente porque tiene manos». No es que la inteligencia resida en los dedos o en las palmas de nuestras manos, pero se manifiesta a través de ellas, permitiéndonos construir lo que ideamos. Los animales también tienen una cierta inteligencia, pero no poseen manos tan sofisticadas como las nuestras. Es esta combinación, entre el intelecto y la habilidad manual, la que ha influido de manera decisiva para hacer del hombre un animal diferente al resto ya que vive en un entorno que él mismo ha modificado. No sólo puede pensar en abstracto o crear una nueva teoría científica, sino que también puede materializarla construyendo nuevos objetos o utensilios. A su vez, la construcción de un nuevo instrumento ayuda a aumentar el conocimiento ya que posibilita experiencias que conducen hacia nuevos pensamientos. Este camino de doble dirección (desde la idea hacia nuevas herramientas y desde esas herramientas a nuevas ideas) ha sido determinante para el desarrollo intelectual de la sociedad. En el caso concreto de la nanociencia, el enorme avance científico que ha

experimentado en los últimos años ha venido sin duda motivado por el desarrollo de nuevas herramientas que han permitido a los investigadores observar, comprender y manipular la nanoescala. De esta manera, no sólo modificamos el entorno que habitamos, sino que también somos capaces de modificar los paisajes del nanomundo.

Las técnicas para obtener información del mundo «nano» se desarrollaron posteriormente a las técnicas de análisis convencional. Éstas últimas permiten conocer las propiedades o composición de los materiales, aunque la mayor parte de ellas ofrecen al investigador información global, es decir, de los átomos y moléculas que lo conforman en su interior. Por ejemplo, la difracción de rayos X, una técnica que ha permitido clasificar los materiales desde hace más de un siglo, nos dice cómo están colocados los átomos dentro del material, ya que los rayos X al incidir sobre él penetran varias micras en su interior. Además, puesto que los objetos del nanomundo están formados por estructuras separadas por unos pocos nanómetros, las técnicas de análisis útiles en este caso deben tener resolución lateral suficiente para identificarlas. Así por ejemplo el microscopio electrónico de barrido (conocido como SEM, del inglés *Scanning Electron Microscope*) tiene una resolución lateral de unos 20-100 nm y es, por tanto, muy útil para describir objetos que midan en torno a la micra, como puedan ser células o granos de polen. Así, a pesar de que la difracción de rayos X y el SEM son técnicas importantes y muy populares entre los investigadores, ninguna de ellas puede ser usada para obtener información de objetos individuales que midan unos pocos nanómetros, como pueda ser una pequeña nanopartícula o una única molécula de ADN. Es decir, la sensibilidad de las técnicas más comunes que se utilizan en un laboratorio convencional está varios órdenes de magnitud por debajo de la que se necesita para estudiar el nanomundo. Para estudiar objetos tan pequeños hacen falta nuevas técnicas con capacidad para ofrecer al investigador información química, estructural o morfológica de muy pocos átomos o distinguir dos puntos que disten entre sí unos pocos nanómetros. Dicho de otra manera, las técnicas útiles para caracterizar los nanobjetos deben tener alta sensibilidad y/o una elevada resolución lateral.

Uno de los motivos por los que la nanociencia ha alcanzado su madurez es porque desde los años ochenta del siglo pasado se han desarrollado nuevas técnicas experimentales que permiten distinguir distintos materiales, fabricar nuevas estructuras o visualizar y manipular diferentes objetos de tamaño nanométrico. Aunque las técnicas disponibles hoy en día son numerosas y muy especializadas, vamos a ofrecer al lector una visión general de las posibilidades que nos ofrece su uso. Haremos especial hincapié en describir aquellas que involucran instrumentación compleja, sin entrar de manera muy profunda en las bases de su funcionamiento, ya que esto requiere unos conocimientos de física o ingeniería muy especializados.

Una idea importante que hay que tener en cuenta para entender las técnicas experimentales de las que vamos a hablar a continuación es que no es posible cazar moscas con una red para mariposas, ni pescar tiburones con un anzuelo para sardinas. Para obtener información sobre un objeto individual y de dimensiones nanométricas, la sonda o partícula que se utilice para su estudio debe ser de su tamaño o inferior. Por ejemplo, si mis dedos estuviesen dentro de una manopla nunca podría escribir en mi ordenador. Para hacerlo, mis dedos deben ser del tamaño de las teclas o más pequeños. Así, si estudiamos un objeto enviándole partículas de un tamaño mayor que él, sólo podremos obtener una información colectiva o promedio de todos los que abarque la sonda, pero nunca individual. Recordemos que la nanotecnología pretende un estudio individualizado de los objetos nanométricos. Este concepto delimita el tamaño de las sondas y, por tanto, las técnicas experimentales que pueden ser utilizadas para estudiar el mundo nanométrico. En primera aproximación, podemos afirmar que la resolución es del tamaño de la sonda utilizada para estudiar la materia. Una posible sonda que se puede utilizar es la radiación electromagnética cuyo «tamaño» característico se puede asemejar a la mitad de su longitud de onda. ¿Cuál es, entonces, la resolución de un microscopio óptico? La de la longitud de onda de la luz con la que incidimos en la muestra, es decir, de micras para la luz visible. Por tanto, con un microscopio óptico nunca podremos obtener información sobre las moléculas ni los átomos que forman un material o nanoestructura, por mucho que mejoremos su sistema óptico.

Otra idea general, que no hay que olvidar cuando describimos las técnicas de fabricación, es que éstas no deben trabajar de una manera secuencial, sino que los productos deben poder obtenerse de manera paralela. Ya discutimos en el «sexálogo» de preceptos del Capítulo 2 que los tiempos de procesamiento pueden llegar a ser infinitos si pretendemos fabricar un dispositivo de manera secuencial. Por desgracia la «paralelización» de muchas de las técnicas que vamos a describir en este capítulo está en entredicho. Ésta es una de las causas por las que muchas de ellas se encuentran actualmente en un estadio de uso en laboratorio, ya que el escalado industrial para poder aplicarlas en paralelo y poder generar nanotecnología con ellas es todavía un reto o una asignatura pendiente.

Las técnicas más utilizadas en la nanoescala pueden clasificarse en técnicas de fabricación, de caracterización, de manipulación y microscopías. Cuando se habla de ellas se utiliza un amplio repertorio de siglas para nombrarlas. Normalmente éstas se corresponden con sus iniciales en inglés. Esto, que es muy práctico en el ámbito profesional, puede confundir terriblemente al lector inexperto o principiante. No obstante, debido a su uso tan extendido, utilizaremos esta terminología en los casos más habituales.

3.2. Técnicas de fabricación

Como ya hemos mencionado en el capítulo anterior, las técnicas experimentales de fabricación de nanoestructuras pueden clasificarse como descendentes (*top-down*) o ascendentes (*bottom-up*). En sentido metafórico decíamos que las primeras utilizan un cincel para fabricar objetos más pequeños, mientras que las segundas unen los ladrillos o estructuras fundamentales para formar objetos de mayor tamaño. Aunque la nanotecnología propugna el uso de técnicas de fabricación ascendentes, la falta de metodologías para construir de esta manera y la disminución del tamaño de las sondas utilizadas en las técnicas de fabricación descendentes hace que éstas últimas sean actualmente las más empleadas y continúen perfeccionándose.

Entre las técnicas descendentes, destacan las llamadas técnicas litográficas, que pretenden adelgazar el material, perfilándolo hasta su forma final como lo haría un escultor. Es importante hacer notar que por el término litografía entendemos el dibujo en relieve de estructuras sobre la superficie de un material, procedimiento que es diferente al empleado en impresión para reproducir obras de arte y que es conocido con el mismo nombre. En tecnología se parte de un material (en el caso de la fabricación de componentes electrónicos puede ser un disco u oblea de silicio de 10 cm de diámetro) y se utilizan cinces del tamaño adecuado para tallar o dibujar sobre su superficie los motivos deseados. Así se fabrican los circuitos impresos y los componentes de microelectrónica que son el corazón de todos los ordenadores. Un escultor utilizaría los cinces más pequeños de los que dispusiese para esculpir los rasgos más delicados. En nanotecnología éstos son esencialmente los haces de fotones (luz), electrones o iones, que están formados por grupos de partículas que viajan juntas como si se tratase de un fino chorro de materia y que son enviados, con alta energía, hacia el bloque de material que se quiere pulir.

Hoy en día se ha disminuido enormemente el tamaño de los haces, llegándose a conseguir de manera rutinaria tamaños muy por debajo de los 50 nm. Recordemos que los tamaños de las estructuras litografiadas para la fabricación de chips son de unos 20 nm y se realizan mediante esta metodología. La ventaja de estas técnicas es que pueden ser integradas fácilmente dentro de las cadenas industriales de producción existentes. El hecho de que tanto los electrones como los iones tengan una carga neta hace que sea posible (y relativamente fácil) su guiado y focalización en un punto de la muestra mediante el uso de campos electromagnéticos. Sin embargo, si se trabaja con fotones ultravioleta (UV) no es sencillo focalizarlos, de manera que se irradia todo el

material. En este caso, el patrón que se desea dibujar se transfiere interponiendo entre la sonda y el objeto una máscara de sombra con la geometría adecuada. Así se consiguen fabricar, por ejemplo, estructuras sobre materiales poliméricos con un tamaño inferior a 200 nm.

Los electrones pueden focalizarse de manera fácil y eficiente, es decir, es posible lograr que la punta del cincel sea casi tan fina como queramos; además, como su longitud de onda es muy pequeña, el tamaño de las estructuras litografiadas es muy inferior al obtenido utilizando fotones UV. Aunque los electrones se comportan normalmente como partículas, también presentan características ondulatorias tal como explica la mecánica cuántica, por lo que no debemos extrañarnos de hablar de la longitud de onda de un electrón.

Para muchas aplicaciones en lugar de electrones se utilizan haces de iones, ligeros e inertes, como pueden ser el He^{++} , Li^+ , Be^{++} . Éstos también se guían y se focalizan con facilidad mediante campos electromagnéticos y presentan la ventaja de que, al tener una masa mucho mayor que la del electrón, erosionan la muestra con mayor facilidad. En general, a las herramientas de fabricación que utilizan haces de iones se las conoce como FIB (del inglés *Focused Ion Beam*). La resolución máxima que se puede alcanzar utilizando electrones o iones está limitada por varios procesos físicos y es, en la actualidad, inferior a unos 20 nm.

Generalmente el proceso industrial es una combinación de todas estas técnicas. En muchas ocasiones se comienza por el dibujo de una máscara de sombra, con la estructura impresa que queramos obtener. Esta máscara se fabrica mediante litografía de electrones o iones y se usa posteriormente para «revelar» con luz ultravioleta, de manera que, como si se tratase de una imprenta, el dibujo pueda replicarse en materiales poliméricos. El uso de máscaras para escalar la fabricación, conocido como nanoimpresión es una solución de muy bajo coste y alto interés tecnológico.

La desventaja de estas técnicas de fabricación descendentes o litográficas es que necesitan una instrumentación muy precisa y compleja, integrada dentro de equipos de vacío altamente especializados. Además, son procesos lentos y secuenciales, que sólo permiten fabricar una pieza detrás de otra. Sin embargo están muy extendidos entre los grupos de investigación, ya que es una forma sencilla de conseguir estructuras que pueden utilizarse en un laboratorio. En la Figura 3.1 se muestra un curioso ejemplo de estructura conseguida mediante técnicas litográficas.

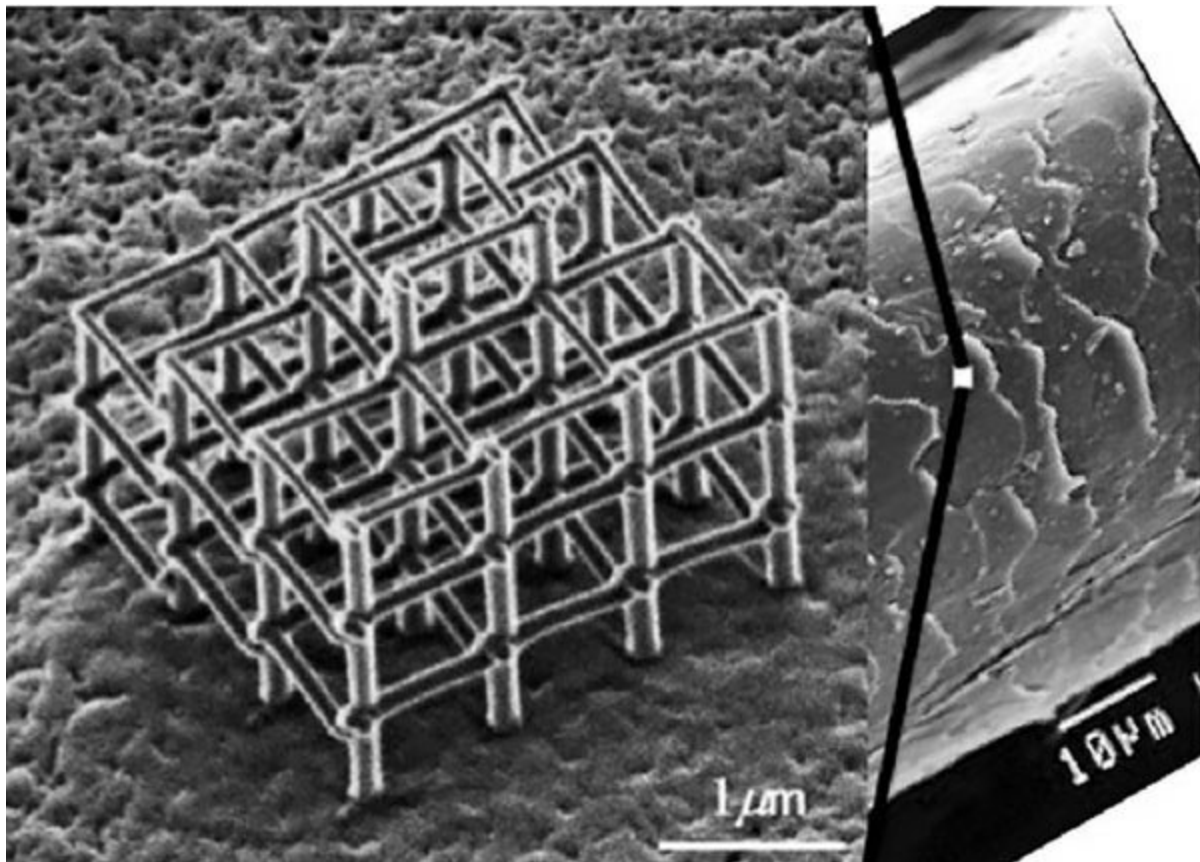


FIGURA 3.1. Imagen de microscopía electrónica obtenida en el Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry and Graduate School of Material Science, Universidad de Hyogo (Japón). El profesor Matsui creó esta estructura tridimensional (nanogimnasio) usando instrumentos del tipo FIB. Está formada por hilos con una anchura de 80 nm cada uno sobre la superficie de un pelo humano.

Tal como se discutió en el capítulo anterior, la adaptación y búsqueda de nuevas técnicas y metodologías para que la aproximación ascendente permita crear nuevas estructuras sigue siendo un reto. Muchas de las técnicas de fabricación ascendente utilizan sencillas metodologías químicas que son adaptadas para cada tipo de material que se quiere obtener, siendo por ello difícil referirse a ellas de manera general. Vamos a centrarnos en las páginas siguientes en describir aquellas que utilizan grandes equipos, como las denominadas PVD (*Physical Vapor Deposition*), MBE (*Molecular Beam Epitaxy*) o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) y que permiten fabricar nuevos materiales sobre todo en forma de lámina delgada, con espesores que varían desde una capa atómica hasta 100 nm. La técnica de CVD se basa en la obtención de átomos a partir de la descomposición de las moléculas que forman un gas. Los átomos obtenidos se reordenan en una superficie para formar otro material diferente. Por ejemplo, si queremos producir una capa de carbono amorfo, podemos descomponer el gas metano (CH_4) de manera que quede libre el carbono para transferirse a una superficie y formar una capa. Cuando estas técnicas se utilizan para fabricar láminas con espesores de pocos átomos se necesitan ambientes muy limpios para evitar que el oxígeno o el

nitrógeno atmosférico se incorporen a la película. Por tanto estos procesos deben realizarse en complejos entornos de alto y ultraalto vacío (UHV, *Ultra High Vacuum*), según la pureza que se desee obtener en la capa. En las técnicas de PVD o MBE los átomos que forman la capa no se obtienen de la descomposición de un gas, sino que directamente se subliman desde un volumen grande de un material. Por ejemplo, se pueden evaporar unos pocos átomos de la superficie de un trozo de hierro sobre otro material, de manera que se genere una pequeña lámina delgada de hierro que lo cubra y le aporte nuevas propiedades magnéticas debido a su espesor reducido.

Un ejemplo de material que se ha obtenido empleando diversas metodologías, algunas de ellas anteriormente citadas, es el grafeno. El grafeno fue aislado por primera vez mediante un procedimiento muy rudimentario que consistía en pegar una cinta adhesiva sobre la superficie de un trozo de grafito y posteriormente tirar para arrancarla. Puesto que el grafito está formado por láminas de grafeno débilmente unidas entre sí, este método separa unas capas de otras. Repitiendo el proceso indefinidamente, al final, se llega a obtener una sola capa de átomos, prácticamente inapreciable a simple vista. Sin embargo, esta metodología que da un resultado excepcional en el laboratorio por su bajo coste, presenta un grave inconveniente para la producción industrial debido a que es una metodología difícilmente escalable. Así comenzó la búsqueda de nuevos métodos de preparación. Uno de estos nuevos procedimientos consiste en utilizar métodos químicos para alejar los planos atómicos de grafito unos de otros, de manera que en el proceso de expansión algunos planos atómicos lleguen a separarse. El número de métodos de preparación, físicos o químicos, de capas de grafeno es enorme. De todos ellos, el que mejor resultado está dando es el de descomponer gases (normalmente hidrocarburos, como acetileno) mediante CVD. En este caso, el grafeno se forma gracias a las propiedades catalíticas de ciertos metales que ayudan a descomponer la molécula de acetileno (C_2H_2) en sus átomos de carbono constituyentes. Éstos, una vez en la superficie del metal se encuentran y recombinan entre ellos para formar grafeno. Posteriormente, mediante un ataque químico se disuelve el metal que ha servido de soporte, obteniéndose así una lámina aislada que flota sobre la disolución. Mediante esta metodología, se ha conseguido crear láminas puras de grafeno en extensiones suficientemente grandes como para ser utilizadas en la fabricación de pantallas planas y táctiles.

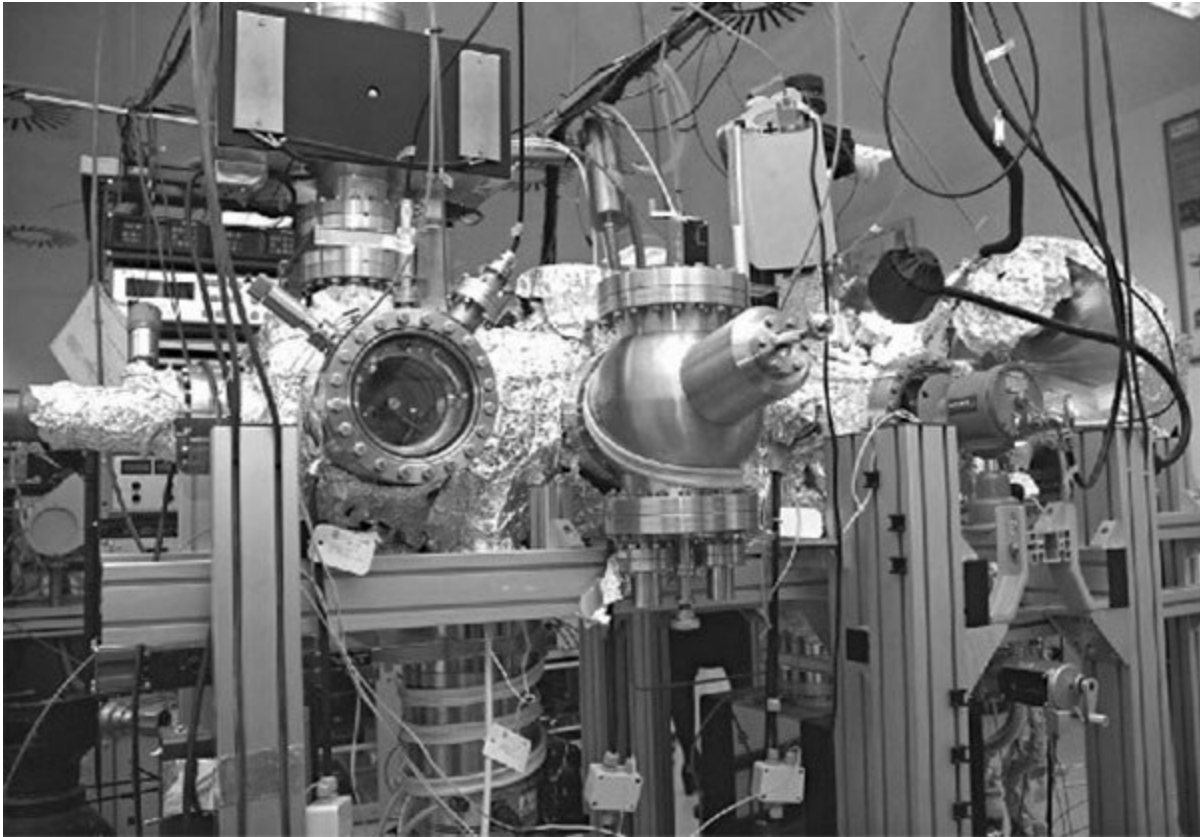


FIGURA 3.2. Fotografía de un equipo de ultraalto vacío utilizado para crecimiento MBE. Imagen tomada en el Departamento de Instrumentación del Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).

Por último, no debemos acabar esta sección sin mencionar las técnicas de autoensamblado molecular. Aunque las estructuras que podemos conseguir con ellas se mostrarán en el Capítulo 6, para introducirlas diremos aquí que utilizan la propia capacidad de reconocimiento que tienen las moléculas estableciendo enlaces no covalentes (por ejemplo, puentes de hidrógeno) entre sí, y ensamblándose hasta formar compuestos superiores o capas ordenadas sobre superficies. El control sobre estos procesos de autoensamblado es un camino importante para la aproximación ascendente y para la implantación de la nanotecnología.

3.3. Técnicas de microscopía

Aunque una parte importante de la sociedad todavía asocia el término nanotecnología únicamente a los nanorrobots, hay ya muchas personas que relacionan esta palabra con imágenes de átomos y moléculas sobre superficies, formando fantásticos paisajes del nanomundo. Estas imágenes han sido tomadas con las llamadas microscopías de campo cercano, a las que se ha llamado los ojos de la nanotecnología.

Se puede afirmar que fue la invención del microscopio de efecto túnel, o STM, lo que sugirió que las ideas de Feynman eran correctas y que realmente los átomos eran los ladrillos más pequeños que estaban a nuestro alcance. El llamado efecto túnel tiene su origen en una propiedad muy básica de la materia que emana de las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica. Gracias a este efecto, un electrón puede atravesar una barrera de potencial. Esta afirmación puede no sorprendernos, pero es algo así como si un hombre pudiese cambiar de un valle a otro de los Alpes de manera instantánea y sin pasar por la cumbre. Es curioso como una idea aparentemente tan abstracta, derivada de complejas ecuaciones de la mecánica cuántica, pudo concretarse en un aparato simple que permitió ver la superficie de los materiales con una resolución sin precedentes. La primera vez que se utilizó este microscopio para visualizar escalones de un solo átomo de altura en una muestra de oro o las posiciones de los átomos de silicio en una superficie fue algo tan increíble para el mundo académico que muchos investigadores se negaban a creer que realmente fuese así o que la técnica pudiese desarrollarse aún más. Sin embargo, su extraordinaria sencillez, su tamaño tan reducido y su capacidad para trabajar en cualquier ambiente han convertido esta técnica en un referente actual.

Las imágenes obtenidas con un microscopio tipo STM nos muestran multitud de paisajes atómicos de extraordinaria belleza, que nos cuesta comprender en su totalidad. Para que nos hagamos a la idea de lo que supone en realidad ver un átomo, tenemos que pensar que el nivel de amplificación necesario es similar al que necesitaríamos para, sentados en la Luna, con un aparato mirar a la Tierra y ver los tornillos de la Torre Eiffel. O al revés, como si dispusiésemos de un telescopio que desde la Tierra nos mostrase el mástil de la bandera que dejó el Apolo XI sobre la superficie lunar.

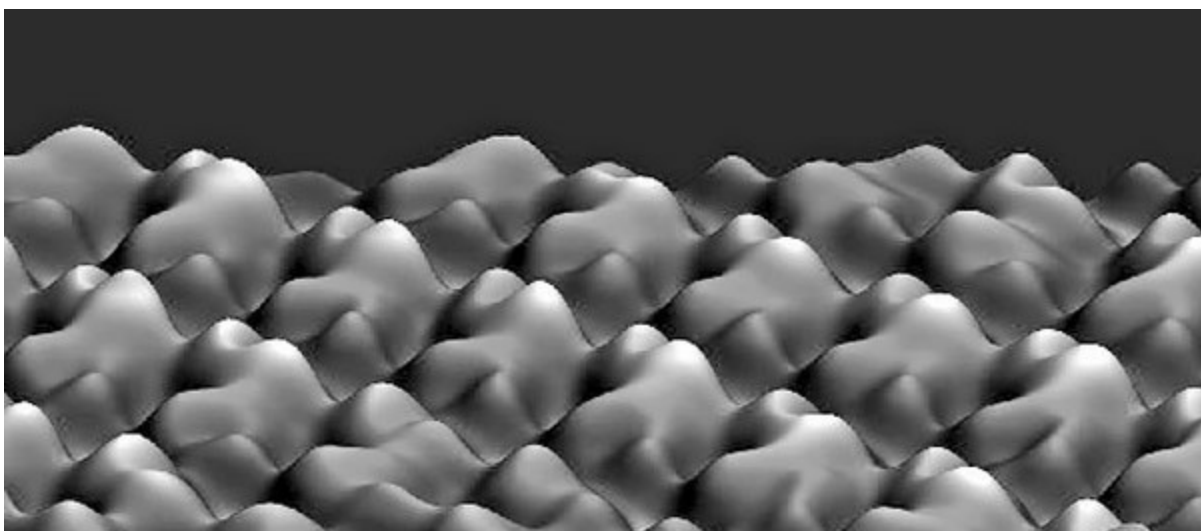


FIGURA 3.3. Paisaje molecular. Imagen tomada con un STM que muestra moléculas orgánicas autorganizadas sobre una superficie. Estas capas pueden ser los constituyentes principales de nuevos dispositivos electrónicos, más rápidos y flexibles que los actuales, basados en silicio. Gentileza del grupo de investigación ESISNA (ICMM-CSIC).

Con el nombre genérico de SPM (del inglés *Scanning Probe Microscope*, microscopía de campo cercano), se conoce no sólo al STM, sino a toda una serie de técnicas similares entre las que podemos destacar el AFM (*Atomic Force Microscope*). Todas ellas se basan en la misma idea: una punta afiladísima se «pasea» por la superficie de un material, siendo capaz de «sentir» su morfología. Esta metodología tan simple permite, sin embargo, obtener resultados asombrosos, ya que si la punta acaba en un solo átomo puede llegar a sentir los átomos de los materiales. Es como si pasásemos a ciegas un dedo por el teclado de un piano y tratásemos de adivinar cómo son y dónde están situadas las diferentes teclas; o dicho de otra forma, como si interpretásemos el mundo que nos rodea leyendo en lenguaje Braille. De esa misma manera, midiendo las subidas y bajadas que realiza una punta al pasearse sobre la superficie de un material, es posible visualizar la forma de los átomos o nanobjetos que encuentra en su camino.

Como ya se ha comentado, la punta (sonda de las técnicas SPM) debe ser del tamaño de los objetos que se deseen detectar. Si queremos ver átomos debería acabar en un solo átomo, como es el caso del STM. Si la punta es más amplia o roma y acaba, no en uno sino en un grupo de átomos, como en el caso del AFM, la resolución es menor y en lugar de átomos podemos estudiar nanopartículas, macromoléculas o cualquier nanobjeto de ese tamaño.

La forma de producir estos «dedos» o sondas tan afiladas es muy curiosa. La punta en el STM es un trozo de hilo metálico que se afila por métodos electroquímicos hasta conseguir que acabe en un solo átomo. Este proceso, aparentemente complicado, es en realidad muy sencillo y poco costoso, aunque a su vez incontrolado e impredecible (unas veces acaba en un átomo, otras no). En el caso del AFM la punta consiste en una pirámide de un material (normalmente silicio) que es fabricada, combinando técnicas litográficas y ataque químico, directamente sobre una plataforma similar a los trampolines que se utilizan en las piscinas. Imaginemos una plataforma de un trampolín en cuyo extremo hay un saltador agarrado a la parte inferior, y que la palanca oscila como si quisiese librarse de él. Ese saltador sería la punta (ver Figura 3.4). De manera análoga, la punta del AFM está montada sobre una palanca rígida (conocida como micropalanca o por su nombre inglés *cantilever*) de dimensiones aproximadas de $120\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$, que al estar sujeta por un extremo puede oscilar verticalmente hasta 20 nm (figura 3.4). Como curiosidad, si aumentamos proporcionalmente estos valores escalándolos hasta los de un típico trampolín de salto olímpico, vemos que la

relación longitud/espesor es similar.

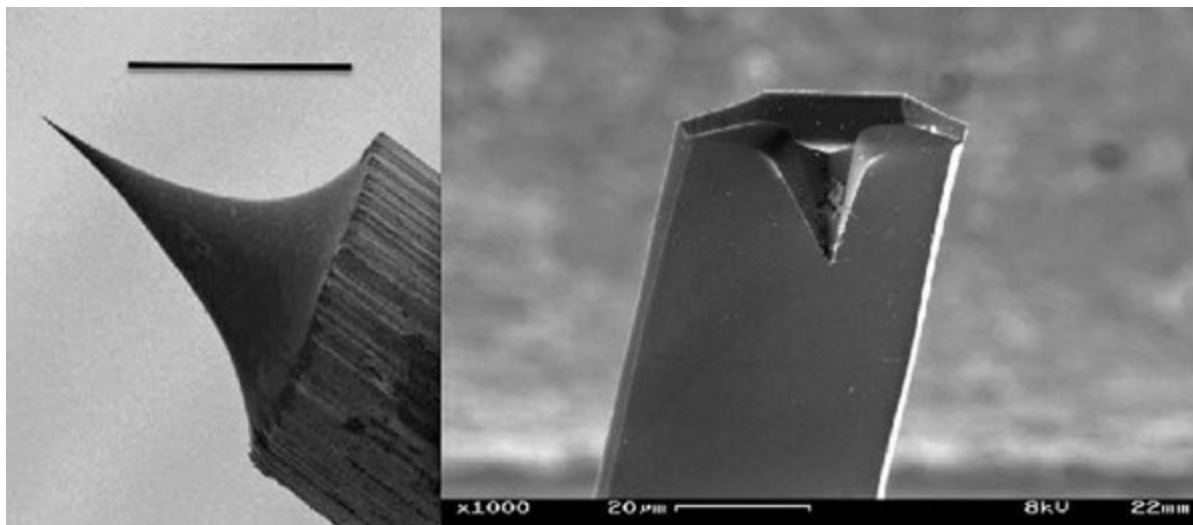


FIGURA 3.4. Fotografías de microscopía electrónica de barrido de una punta hecha de wolframio y afilada electroquímicamente para utilizarse en un microscopio STM (izquierda) y de una micropalanca de un AFM (derecha). Las líneas de escala en las imágenes son 200 μm (izquierda) y 20 μm (derecha).

Una vez que sabemos cómo fabricar una punta afilada nos surge otra pregunta para entender el funcionamiento de estas técnicas: ¿cómo es posible desplazar la punta con la precisión lateral necesaria para ver un único átomo? Para ello la punta debe moverse en intervalos mucho más pequeños que la distancia interatómica. Muchos ingenieros podrían sorprenderse al saber que se puede mover un objeto con una precisión superior a 0,1 Å (0,01 nm). La solución es relativamente simple y consiste en sujetar la punta a unos tubitos construidos de materiales piezoeléctricos. Estos materiales tienen la propiedad de que al aplicar un voltaje determinado se estiran o se encojen una cierta longitud y, como la punta va unida a uno de ellos, se desplaza esa misma cantidad. Los valores típicos del movimiento de la punta son del orden de 0,1 nm por voltio, es decir, aplicando un voltaje se coloca la punta sobre un átomo y aumentándolo en un voltio la movemos hasta el átomo vecino. Hoy en día las fuentes de alimentación se pueden construir con una precisión y estabilidad asombrosas y, por tanto, podremos posicionarnos sobre una superficie con precisión atómica. Se puede afirmar que, al igual que en una factoría de vehículos un brazo robotizado es capaz de moverse en las tres dimensiones del espacio con una precisión milimétrica, en los laboratorios los investigadores son capaces de mover las puntas y palancas de estos microscopios con precisión subatómica.

En un microscopio SPM se desplaza la punta por la superficie midiendo la interacción (corriente eléctrica, fuerza...) entre ambas y mediante un sistema electrónico, que permita subir y bajar la punta, se sigue la topografía de la superficie.

La metodología que utilizan estos microscopios para funcionar es algo así como sobrevolar un paisaje con un helicóptero manteniendo una altura constante. El movimiento vertical, arriba y abajo, que debería realizar el helicóptero para conservar fija la distancia al suelo, corresponde con una línea del perfil de la topografía.

La microscopía electrónica había sido hasta el *boom* de los SPMs la técnica microscópica más importante y extendida entre la comunidad científica. De hecho, prácticamente todos los centros de investigación relacionados con el área de materiales o biología cuentan con algún tipo de microscopio electrónico. Sin embargo, en la actualidad esta tendencia se va tornando a favor de los microscopios de campo cercano. Es indudable que los SPMs ofrecen una serie de ventajas que los hacen imbatibles de una manera global. Por ejemplo: su precio. Hasta cincuenta veces más baratos que un microscopio electrónico. Además, los SPMs pueden trabajar en cualquier ambiente: en líquidos, en vacío o en aire. El hecho de poder estudiar objetos en el interior de una celda líquida, utilizando por ejemplo condiciones fisiológicas, ha convertido a estas técnicas en una herramienta única en biología. Los microscopios electrónicos requieren introducir la muestra en vacío, teñirla o recubrirla de una capa metálica y someterla a una elevada irradiación electrónica, tratamientos que sin duda alteran la morfología o integridad del material estudiado. Por último, es importante destacar que, mientras que en las imágenes de microscopía electrónica la altura de un objeto no tiene un valor determinado ya que se corresponde con cambios de contraste en la imagen, en los SPMs esta cantidad tiene un valor absoluto. Recordemos que éstos producen la imagen mediante el movimiento vertical de la punta que «sobrevuela» un objeto muy cerca de su superficie a una distancia constante. La altura del objeto no es más que lo que ha tenido que subir o bajar la punta para pasar por encima de él, sin variar su distancia a la superficie.

En honor a la verdad, no todo son ventajas en el mundo de los SPMs, sino que también presentan algunos inconvenientes o aspectos que tienen que mejorarse en los nuevos diseños. Uno de ellos es la dificultad para situar la punta en una zona concreta con precisión o para encontrar una zona particular de la muestra en estudio a partir de un punto que se reconozca a simple vista. Pensemos que encontrar una nanoestructura cuadrada de 10 nm de lado sobre la superficie de un material de 1 mm × 1 mm es como encontrar una motocicleta en un desierto del tamaño de la provincia de Cáceres. En este sentido, la facilidad con la que los microscopios electrónicos lo consiguen es inmejorable. La punta es la segunda desventaja de estas técnicas, principalmente en el caso del STM, donde ésta debe acabar en un solo átomo y ser estable. Hoy en día la punta es el talón de Aquiles de los SPMs, ya que es un factor verdaderamente incontrolado e impredecible, pues fácilmente puede perderse ese átomo durante la

medida o también puede adherírsele otro proveniente de la superficie o del gas residual (sobre todo cuando se toman imágenes de moléculas orgánicas). Estos procesos dan lugar a pérdidas y cambios bruscos en la resolución durante el proceso de medida. Un problema que aparece frecuentemente durante la adquisición de imágenes es la aparición de puntas dobles, que generan dos (o varias) imágenes superpuestas.

De todo esto se deduce que el verdadero caballo de batalla de estas técnicas es la fragilidad y la forma incontrolada de las puntas. Ante este problema, el AFM se ha especializado en entornos en los que no se requiere tanta resolución lateral, es decir, el AFM renuncia a obtener imágenes con resolución atómica para poder trabajar con puntas más anchas que le permitan tener una mayor estabilidad. Esta facilidad del AFM para estudiar distintos entornos de manera estable es la responsable de que se haya convertido en pocos años en una herramienta muy importante en ciencia de materiales o en biología. En el caso del STM, puesto que la resolución máxima depende de la forma de la punta, se están realizando experimentos que consistan en depositar átomos o moléculas simples de manera controlada sobre la punta, como hidrógeno o monóxido de carbono (CO). De esta manera los investigadores pueden estar seguros de que la punta acaba en un solo átomo, y saber cuál es ese átomo. Las imágenes obtenidas por algunos grupos de investigación con esta metodología son verdaderamente impresionantes.

Una característica de estas técnicas, principalmente del AFM, es la capacidad de realizar un trabajo en un punto muy específico, por ejemplo, mediante la aplicación de fuerza (apretando) sobre un átomo, una molécula o una proteína concreta, de manera controlada y, a la vez, midiendo el valor de esa fuerza. Este tipo de experimentos nos permite obtener un mapa de las propiedades elásticas de los objetos que nos encontramos en el nanomundo. Además, la punta puede funcionalizarse, es decir, modificarse con la inclusión de ciertas moléculas para que reaccionen con otras en la superficie y medir el valor de las fuerzas involucradas. Como veremos en el siguiente apartado, la funcionalización de la punta ha abierto un nuevo camino a la manipulación en la nanoescala.

En el campo de la microscopía de alta resolución (aunque sería mejor hablar de nanoscopia) cabe destacar que en los últimos años se han desarrollado enormemente las capacidades de los microscopios de transmisión electrónica (TEM, del inglés *Transmission Electron Microscope*), mediante el uso de complejos y carísimos instrumentos en los que los electrones se aceleran hasta 400 kV dentro de tubos de vacío de varios metros de longitud. Estas enormes energías hacen que la longitud de onda de los electrones sea muy pequeña, alcanzándose mayor resolución. Esto ha permitido observar con gran nitidez los átomos de algunos materiales. Estos microscopios, debido a su elevadísimo coste, se utilizan como grandes instalaciones

abiertas a cualquier usuario que tenga un proyecto de investigación interesante. En estos momentos España cuenta con media docena de estos microscopios que son considerados como infraestructuras científico-técnicas singulares.

3.4. Técnicas de caracterización

Desde que M. Laue, a principios del siglo XX, realizó los primeros diagramas de difracción de rayos X, se conoce la disposición de los átomos en el interior de muchos materiales cristalinos. Sin embargo, hasta hace muy pocos años no se ha podido conseguir difracción que provenga exclusivamente de la última capa atómica de un material. La dificultad se debe a que en la superficie hay varios millones de veces menos átomos que en el interior y, por tanto, las técnicas experimentales no tenían suficiente sensibilidad como para obtener una señal clara y exclusiva de la superficie.

El estudio experimental de las superficies a nivel atómico comenzó en los años setenta mediante técnicas normalmente basadas en el uso de electrones o iones, ya que al no penetrar mucho en los materiales ofrecen al investigador una información esencialmente superficial. El hecho de que estas técnicas surgiesen en los años setenta no es fruto del azar, sino que hubo que esperar a disponer de tecnologías avanzadas de ultra alto vacío (UHV) para poder confinar, enviar y detectar electrones sin que fuesen aniquilados por el gas atmosférico. De nuevo, nos encontramos ante avances científicos que vienen motivados por desarrollos tecnológicos.

Las técnicas de caracterización, al igual que las de fabricación, se pueden clasificar según el tipo de sonda que utilicen. Así se pueden dividir en las que envían fotones (como la fotoemisión, la difracción o el Raman), electrones (como el Auger) o iones (como la dispersión de iones). La sonda interacciona con la superficie y como fruto de esa interacción se recogen los electrones, iones o fotones resultantes del proceso. Estas técnicas son tantas y tan especializadas que una descripción profunda de las mismas excede las posibilidades de este libro. Durante los últimos años se han perfeccionado, de manera que hoy pueden llegar a detectar del orden de una milésima de monocapa, es decir, aproximadamente unos 10^{12} átomos por cm^2 . Aunque este número pudiese parecer alto, debemos tener en cuenta que en 1 cm^3 de un material hay aproximadamente 10^{23} átomos y que, en realidad, una milésima de monocapa equivale a unos pocos átomos desperdigados sobre una superficie.

En los últimos años se ha producido un avance importante al desarrollarse una serie de técnicas que combinan la caracterización con la microscopía, pues esta última sólo

nos informa sobre la forma de los objetos, pero no sobre su composición química; es decir, no nos dice de qué están hechos. Actualmente existen microscopios de fotoemisión, o microscopios Raman, que nos indican dónde se encuentra cada elemento químico sobre la topografía de un material. Un ejemplo lo tenemos en la Figura 3.5 donde se puede apreciar que la micropalanca de AFM está fabricada de silicio y no contiene nada de carbono.

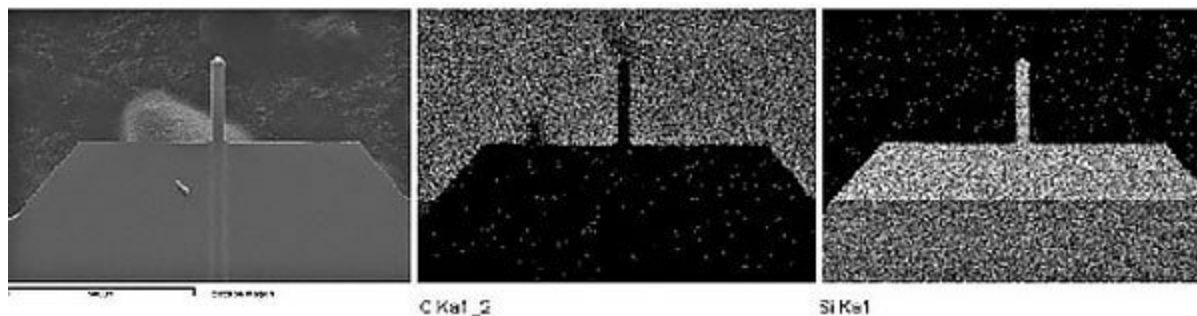


FIGURA 3.5. Imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de una punta de AFM. La imagen de la izquierda es la topografía, las otras dos son imágenes realizadas recogiendo exclusivamente la señal que proviene del carbono (imagen central) y del silicio (imagen de la derecha).

Muchos son los desarrollos tecnológicos que han ampliado el ámbito de aplicación para el que fueron creados, como es el caso de las palancas de AFM. El uso de estas palancas ha saltado desde el mundo de los SPMs al de los detectores ultrasensibles. Es decir, desde el mundo de la microscopía al de los sensores, pues al depositar algo sobre ellas se deforman ligeramente o cambian sus propiedades mecánicas de manera que se produce un ligero movimiento. Estos movimientos se detectan de una manera muy sencilla: mediante la reflexión de un haz de luz láser sobre su superficie. Si la palanca se comba hacia arriba, la reflexión del láser se desplazará de igual manera. Es como si sobre el extremo de un trampolín se colocase alguien con mucho peso, la plataforma se combaría más que si se colocase alguien más liviano. Midiendo la desviación de la reflexión de un láser en el extremo del trampolín y su constante elástica, podríamos conocer el peso del saltador. En realidad en el mundo nanométrico no se estima el peso sino la interacción entre el objeto y la palanca. Al adsorberse una molécula o nanopartícula se modifica la tensión interna y, como consecuencia, la palanca se comba. Esta estrategia, simple pero muy efectiva, permite detectar cantidades muy pequeñas de una sustancia, como veremos en el Capítulo 7.

Además de estas técnicas de observación específicas de la nanotecnología, cabe citar en este apartado las grandes instalaciones científicas. Los grandes radiotelescopios o los aceleradores de partículas son algunas de las más conocidas por su impacto mediático. Sin embargo, esta categoría es mucho más amplia y también

engloba a los aceleradores de iones, los reactores de neutrones y los sincrotrones, que pueden considerarse como un nuevo tipo de microscopios-espectrógrafos gigantes. Podemos definir una gran instalación como un proyecto interdisciplinar y de coste muy elevado, tanto que no es asumible por un solo país o grupo de investigación. Aunque estas instalaciones no se usan exclusivamente para investigaciones derivadas de la nanociencia, éste es sin duda uno de los usos prioritarios y en claro auge. Estas máquinas ofrecen una cantidad ingente de información sobre la estructura de la materia. De entre todas ellas, las que más aplicaciones tienen en nanociencia son las llamadas instalaciones para la producción de radiación sincrotrón (conocidas a secas como sincrotrones). Se puede decir que son herramientas kilométricas para estudiar objetos nanométricos. Por ejemplo, el sincrotrón europeo, llamado ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*), situado en Grenoble (Francia), tiene una longitud de más de un kilómetro y en su interior contiene más de cincuenta laboratorios para realizar experimentos durante las veinticuatro horas del día. El edificio que lo alberga es mayor que un campo de fútbol. El sincrotrón puede considerarse una fuente de luz enorme y sofisticada. Enorme porque requiere de un acelerador de electrones de grandes dimensiones. Sofisticada porque a través de una compleja instrumentación puede generar luz con alta intensidad de cualquier longitud de onda dentro de un amplio espectro, desde el infrarrojo hasta los rayos gamma. Aunque estas máquinas pueden producir radiación de cualquier energía, la mayor parte de ellas se centran en la producción de rayos X, radiación que es muy difícil de producir por otras técnicas.

La diferencia entre los sincrotrones y los aceleradores de partículas, que son aún más grandes, como el CERN (*Centro Europeo de Investigación Nuclear*) en Ginebra, es que éstos hacen colisionar las partículas entre sí para conocer su estructura interna, mientras que los sincrotrones intentan que los electrones giren indefinidamente, o por lo menos, el mayor tiempo posible. El motivo es que las partículas cargadas, como los electrones, al describir trayectorias circulares emiten radiación electromagnética que puede ser utilizada por científicos de muy diversas áreas para realizar experimentos. Durante el año 2012 el sincrotrón español, llamado ALBA y situado en Cerdanyola del Vallès (Barcelona), comenzó su fase de explotación abriendo sus puertas a usuarios de todo el mundo. ALBA es otra de las instalaciones científico-técnicas singulares que se han puesto en marcha en nuestro país. De las siete líneas con las que ha arrancado, más de la mitad están de alguna manera relacionadas con la nanociencia.

3.5. Manipulación en la nanoescala

Al poco tiempo de que se comenzaron a obtener imágenes utilizando el microscopio STM para ver como se disponían los átomos en las superficies de los materiales, surgió una nueva idea. Como hemos dicho, la punta se acerca mucho al objeto en estudio, tanto que se establece una pequeña interacción entre ambos. Pues bien, los investigadores comenzaron a preguntarse por qué no utilizar esas pequeñas fuerzas que se establecen entre la punta (que acaba en un solo átomo) y la muestra para modificar las posiciones de los átomos que forman ésta última. Es decir, transformar el microscopio en una herramienta para modelar la materia, en los dedos que nos permitan construir un puzle en la nanoescala. Habíamos dicho anteriormente que ver un átomo con un microscopio SPM requiere una amplificación similar a la que se necesita para observar cómo son los tornillos de la Torre Eiffel desde la Luna. Pues bien, ahora vamos a dar un paso más en lo que se llama construcción ascendente al utilizar estos microscopios, no sólo para observar cómo son los tornillos, sino también para apretarlos y aflojarlos a conveniencia.

Los primeros en lograr esta hazaña fueron investigadores de la multinacional IBM, en Almaden (EE.UU.), que sorprendieron al mundo en el año 1991 escribiendo con átomos el logotipo de su compañía. El grupo dirigido por D. Eigler fue capaz de colocar 35 átomos de xenón sobre una superficie de níquel. Más tarde, este mismo grupo creó los llamados «corrales cuánticos», átomos colocados formando figuras geométricas cerradas como si fuesen cercas (ver Figura 3.6). Estos experimentos abrieron la puerta a la manipulación atómica y a soñar que verdaderamente era posible cambiar de posición un solo átomo, por ejemplo para escribir con ellos, tal como Feynman había predicho treinta años antes. Desde ese momento, numerosos grupos de investigación fueron aprendiendo y dominando los mecanismos para la manipulación atómica, hasta el punto que escribir con átomos el logotipo de un instituto de investigación o de una universidad ha llegado a ser rutinario cuando se trabaja con un STM a bajas temperaturas.

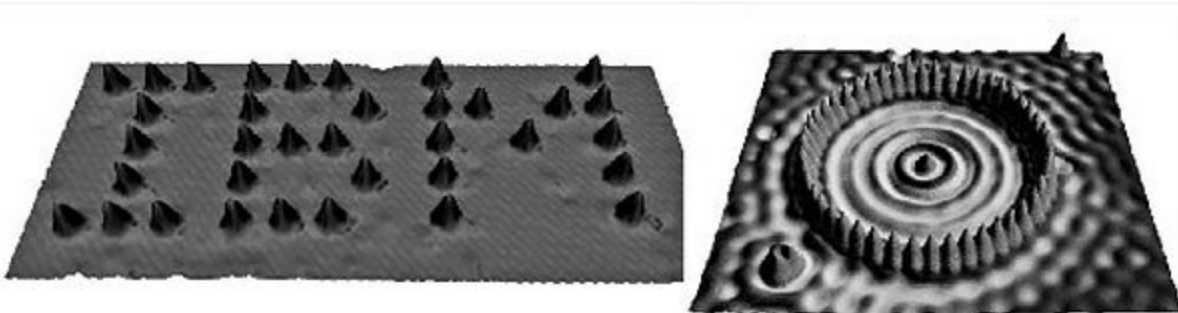


FIGURA 3.6. Manipulación de átomos mediante STM. La fotografía de la izquierda fue un hito en la historia del STM, ya que por primera vez se manipularon átomos individuales con esta técnica. Para realizar la imagen de la derecha se colocaron 48 átomos formando una estructura circular. Cuando se cierra el círculo atómico, en el interior se forman unos anillos concéntricos que corresponden a interferencias de ondas electrónicas. Imágenes creadas por IBM Research Corporation. <http://researcher-ibm.com/researcher/view_project.php?id=4245>.

Debemos recordar que los inventores del STM, G. Binnig y H. Rohrer, estaban trabajando también para la empresa IBM, en Zúrich (Suiza). Es asombroso como en esa época las grandes compañías multinacionales invertían en investigación básica contribuyendo de manera decisiva al avance de la ciencia fundamental. Actualmente este tipo de investigación básica ha desaparecido de las empresas, debido a que la mayor competitividad impuesta por la globalización hace que los recursos se dediquen mayoritariamente a realizar investigaciones mucho más aplicadas.

La difusión de imágenes tan espectaculares, que mostraban la capacidad para interaccionar con los átomos, consiguió crear un ambiente científico propicio para la especulación. Así se comenzó a hablar de escritura atómica y muchos grupos comenzaron a estudiar cómo se podría utilizar esta herramienta para obtener la máxima capacidad de integración posible. Este tipo de escritura permitiría llegar al límite de la miniaturización del almacenamiento magnético actual: por ejemplo, el bit más pequeño que pudiésemos imaginar consistiría en un solo átomo, en el que colocando su «espín» hacia arriba o hacia abajo mediante la punta, almacenase un valor de 1 o 0. El espín es una propiedad cuántica del electrón que puede asociarse a una rotación del mismo sobre su eje y por tanto tiene dos valores izquierda-derecha o bien arriba-abajo. Esta propiedad está en el origen del magnetismo atómico. Otros investigadores estudiaron la posibilidad de construir el cable conductor más pequeño del mundo. Combinando ambas ideas se podrían fabricar los dispositivos más pequeños imaginables: información almacenada digitalmente utilizando un bit por átomo, cables monoatómicos y, por qué no, para realizar la conexión se podrían utilizar nanotubos de carbono que actuarían como material semiconductor.

Sin embargo, esta metodología de ensueño, que consiste en la fabricación de estructuras átomo a átomo, presenta varios problemas prácticos para llegar a convertirse en una tecnología real. Si miramos los seis preceptos del Capítulo 2, veremos que no cumple varios de ellos. En primer lugar se trata de un método secuencial y terriblemente complejo en el que los átomos se colocan formando estructuras estables a temperaturas muy bajas, del orden de unos 4K (aproximadamente $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$). Además, deben estar dentro de sistemas de ultra alto vacío (como el que se muestra en la Figura 3.2), con presiones cercanas a las que uno encuentra en el espacio interplanetario. De lo contrario la capa atómica que contiene la información se contaminaría con las moléculas que existen en nuestra atmósfera y se perdería la

información. Además, estos nanocables atómicos no pueden transportar corrientes eléctricas, ya que el calor disipado los movería de sitio, alterando de nuevo la información o «rompiendo» el cable. Estos requerimientos técnicos, de vacío y de temperaturas muy bajas, hacen que esta solución no sea la más adecuada para la nanotecnología. Sin embargo, su falta de aplicabilidad no quita mérito a unos experimentos de los que la ciencia ha aprendido mucho sobre la materia a escala atómica y que han sido la base de muchos otros.

Sin embargo, aumentando un poco el tamaño de la punta y renunciando a manipular un sólo átomo, se pueden conseguir sistemas nanométricos estables, duraderos y baratos, que realmente tengan aplicaciones nanotecnológicas. Todos estos métodos explotan la idea de localidad, es decir la capacidad de la punta para actuar en un punto concreto de una superficie con el objeto de modificarla o estudiarla. Por ejemplo, si bajo la punta creamos un diminuto cuello o menisco de agua (unos nanómetros de ancho) y aplicamos un pequeño voltaje podemos oxidar localmente esa zona de la superficie. Si mientras llevamos a cabo esta oxidación movemos la punta podríamos llegar a escribir sobre la superficie. Es como si sobre un «papel» de silicio llegásemos a escribir con la punta del AFM trazos hechos de óxido de silicio. En la Figura 3.7 tenemos un fragmento del *Quijote* escrito con esta técnica por un grupo de investigación español. Con esta capacidad de amplificación podríamos conseguir escribir todo el *Quijote* en un área equivalente al de la sección de seis pelos humanos. Debemos pensar que, a diferencia de la Figura 3.6, donde cada punto es un átomo, aquí los trazos que forman las letras tienen un ancho de unos 10 nm y, por tanto, una letra está formada por unos 100 000 átomos.

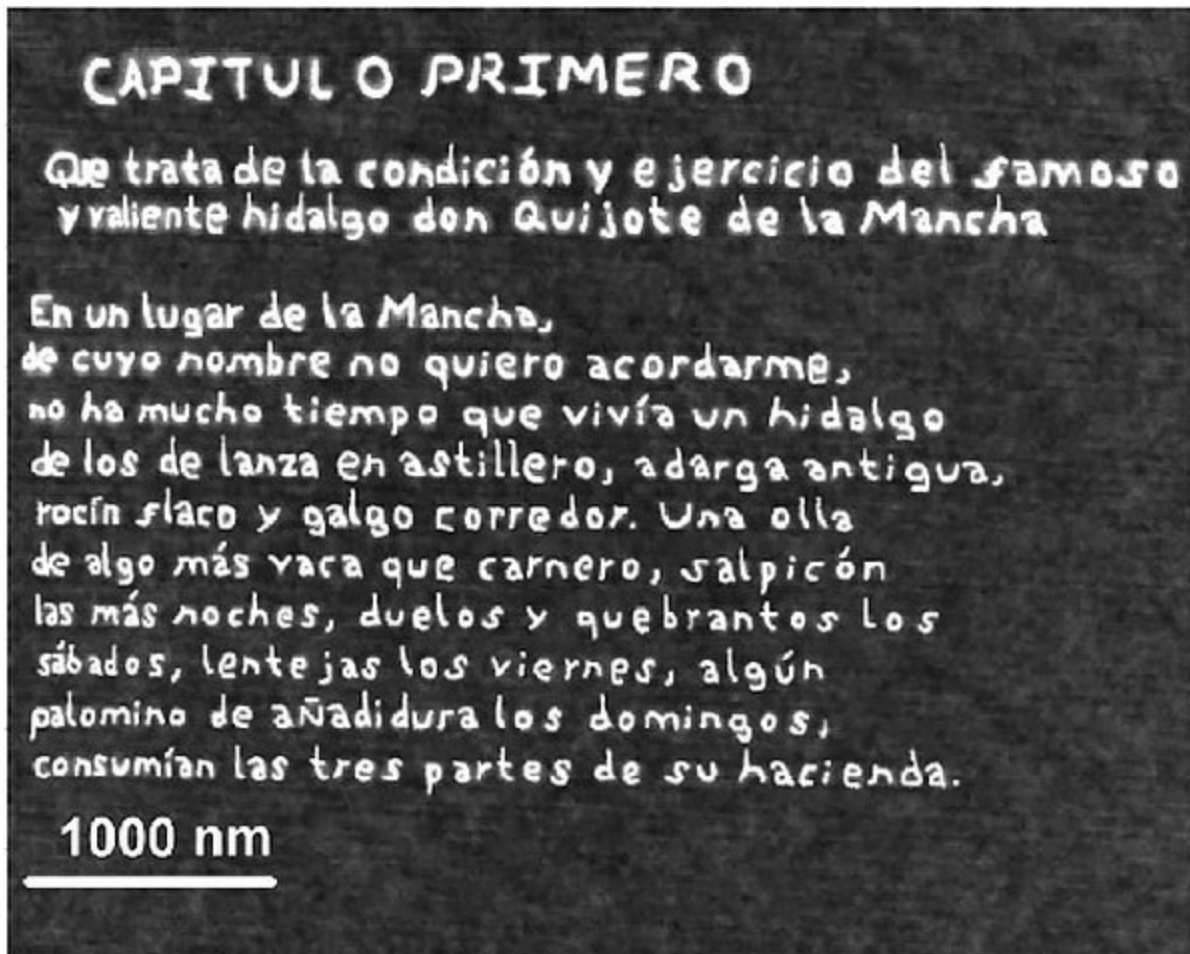


FIGURA 3.7. Mediante el método de oxidación local y empleando un AFM, los investigadores lograron escribir un fragmento de el *Quijote* utilizando letras con un «tamaño de fuente» de unos 10 nm. Gentileza de R. García (ICMM-CSIC).

Una variante, también basada en la capacidad de incidir localmente sobre un material, es la llamada *Dip-pen Lithography* (no existe traducción reconocida en castellano, pero sería algo así como litografía de escritura con mojado). En esta técnica la punta del AFM actúa como una pluma estilográfica, impregnándose de moléculas que posteriormente se depositan sobre una superficie. Esto permite crear estructuras moleculares a voluntad que pueden utilizarse para varios fines. Con todo ello, hoy en día puede decirse que una de las aplicaciones de la microscopía de AFM es la manipulación de superficies o de materiales. Puede modificarse el sustrato, introduciendo campos eléctricos para crear deformaciones locales que cambien sus propiedades o explorar otras muchas posibilidades abiertas a la imaginación del investigador.

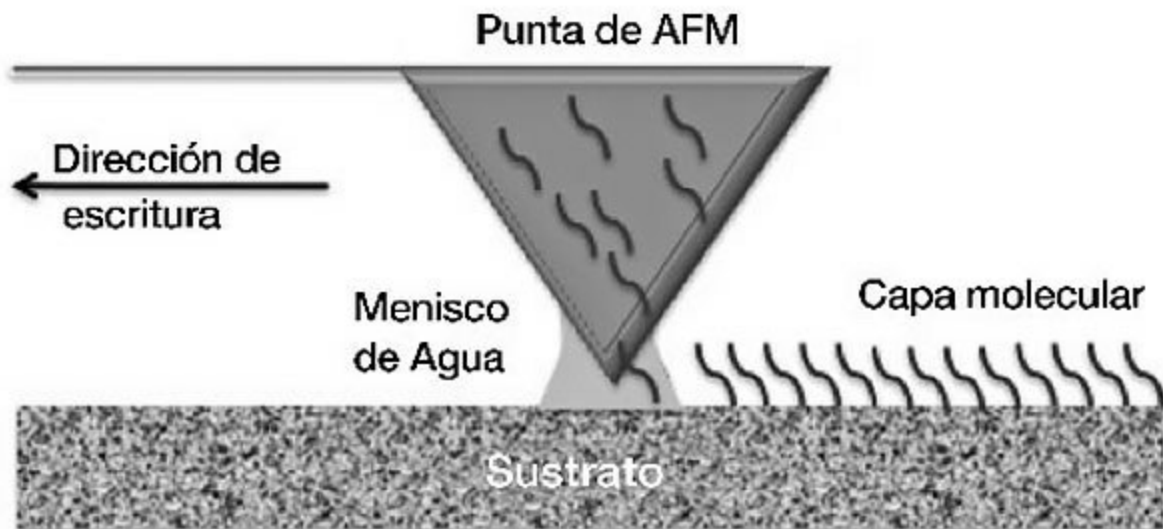


FIGURA 3.8. Esquema de funcionamiento de la técnica llamada *Dip-pen Litography*: escribiendo con moléculas como si se utilizara una pluma estilográfica.

La funcionalización de la punta es una técnica que permite dotar a la misma de nuevas capacidades o funciones, de forma que pueda aplicarse para medir propiedades eléctricas, magnéticas o mecánicas de los materiales de manera relativamente sencilla. Consiste en recubrir la superficie de la punta con moléculas o capas delgadas. Por ejemplo, el uso de puntas (tanto en STM como en AFM) recubiertas con capas muy delgadas de materiales que presenten propiedades magnéticas permite determinar la fuerza magnética entre sonda y superficie y, por tanto, la obtención de imágenes en las que se pueden apreciar zonas pequeñas que tienen una magnetización diferente a otras. Estas zonas, conocidas como dominios magnéticos, son las que en los discos duros almacenan los bits.

También cabe destacar aquellas aplicaciones en las que se modifica la punta con algún grupo químico capaz de reconocer, por ejemplo, una molécula biológica, como una proteína o una hebra de ADN, y aprovechar así la capacidad de reconocimiento molecular del material biológico. Otros investigadores han unido nanotubos de carbono (Figura 4.5A) o pequeñas nanopartículas a las puntas de AFM para aumentar su dureza o disminuir su tamaño y mejorar así su resolución. La funcionalización de las puntas ha abierto un camino sencillo para manipular nanobjetos.

Por último conviene citar que se están realizando grandes esfuerzos para «paralelizar» estos sistemas mediante la inclusión de redes de palancas ordenadas que puedan funcionar todas simultáneamente. Conseguir que este tipo de sistemas funcionen de manera estable es fundamental para alcanzar la fabricación masiva, o el escalado, que requiere la industria. Aún queda mucho camino por recorrer y podemos afirmar que estamos en la prehistoria de la nanofabricación ascendente.

— 4 —

**NUEVOS MATERIALES PARA UNA NUEVA REVOLUCIÓN
TECNOLÓGICA**

Ocurre, pues, que cada elemento le dice algo a cada uno (a cada cual una cosa diferente), igual que pasa con los valles o las playas visitados durante la juventud. Y sin embargo, tal vez convenga hacer una excepción con el carbono, porque a todos se lo dice todo. Quiere decirse que no es específico, de la misma manera que Adán no es específico como antepasado, a no ser que aparezca hoy (¿y por qué no?) el químico-estilista que haya dedicado su vida entera al grafito o al diamante. Y sin embargo, precisamente con el carbono tengo una vieja deuda, contraída en días decisivos para mí. Al carbono, elemento de la vida, se refería mi primer sueño literario, insistentemente soñado en un momento y un lugar en los cuales nadie hubiera dado mucho por mi vida. Mire usted por dónde, quiero contar la historia de un átomo de carbono.

¿Es lícito hablar de «un cierto» átomo de carbono? El químico podría ponerlo un poco en duda, porque hasta nuestros días (1970) no se conocen técnicas que permitan ver, y por lo tanto aislar, a un átomo solo. Para el narrador, en cambio, no existe la menor duda, y por eso se dispone a narrar.

Verdaderamente el carbono es un elemento peculiar. Es el único que sabe aliarse consigo mismo en largas cadenas estables sin gran despilfarro de energía; y en la vida sobre la tierra (la única que conocemos por ahora) se dan precisamente largas series de cadenas. Por eso el carbono es el elemento clave de la sustancia viviente; pero su promoción, su ingreso en el mundo vivo, no es fácil, y tiene que seguir un camino obligatorio, intrincado, solamente esclarecido (y aún no definitivamente) en estos últimos años.

PRIMO LEVI, *El sistema periódico*, El Aleph Ediciones, Barcelona 2004

4.1. Los materiales para el siglo XXI

El avance producido en el ámbito tecnológico a lo largo de los siglos ha ido acompañado por el desarrollo de diferentes materiales que, a su vez, han potenciado innovaciones aplicables al campo de la construcción, de la medicina o de las comunicaciones. Así, actualmente nos encontramos rodeados de objetos fabricados a partir de materiales (como el acero, el plástico o las fibras sintéticas) que no existen en la naturaleza, sino que han sido creados por el hombre en algún momento de la historia para responder a la necesidad de mejorar su bienestar. Hoy en día, gracias a la

nanotecnología, estamos inmersos en lo que puede considerarse una nueva revolución tecnológica y, por tanto, cabe preguntarse qué tipo de nuevos materiales se están desarrollando, a qué posibles aplicaciones darán lugar y cómo esto cambiará nuestra vida cotidiana.

El término «nuevos materiales», aunque es intrínsecamente ambiguo pues varía en el tiempo, se utiliza para hacer referencia a una serie de materiales descubiertos recientemente o que incluso se encuentran en proceso de desarrollo, a los que se están dedicando numerosas investigaciones científicas por la gran potencialidad que presentan sus aplicaciones. Muchos de los nuevos materiales que se están desarrollando en el marco de la nanotecnología suponen combinaciones de materiales básicos que todos conocemos, como los metales, los polímeros o las cerámicas. De esta manera se aprovechan las características de unos y otros para dar lugar a un producto final con propiedades nuevas y mejoradas respecto a sus componentes. En estos casos, es decir, cuando un material se obtiene a partir de combinaciones de diferentes materiales, nos encontramos ante un material compuesto. Si además los materiales de partida incluyen estructuras nanométricas, al producto resultante se le denomina nanocompuesto (o nanocomposite, vocablo inglés con el que se conoce en el mundo tecnológico).

Uno de los retos en el desarrollo de nuevos materiales radica en lograr dotarlos de unas propiedades específicas y adecuadas para la aplicación o función concreta en la que se quieran utilizar. Por eso, muchos de estos materiales de nuevo cuño se denominan materiales funcionales. Si el material creado es además capaz de responder de una determinada manera ante estímulos externos, estaríamos ante un material «inteligente» que se comportaría de una manera u otra dependiendo del entorno.

Pongamos un ejemplo para aclarar estas diversas denominaciones con las que pueden designarse los nuevos materiales que se están diseñando y utilizando en el marco de la nanotecnología. Imaginemos que quisiésemos fabricar un músculo artificial que fuese capaz de retorcerse con una flexibilidad parecida a los tentáculos de un pulpo y mover objetos mucho más pesados que él; todo ello por la simple aplicación de un voltaje. Es evidente que para lograrlo necesitaríamos crear previamente un material que fuese elástico, ligero, resistente, y capaz de realizar movimientos de torsión al recibir impulsos eléctricos. Es decir, necesitaríamos que presentase unas propiedades nuevas y mejoradas que fuesen una combinación de las de varios materiales convencionales (como la elasticidad de una goma, la ligereza de la espuma o la resistencia del acero). Esto podría lograrse fabricando un material compuesto, es decir, tomando como punto de partida otros ya conocidos que posean las propiedades que buscamos. El material compuesto así diseñado sería además funcional, pues, gracias a sus nuevas

propiedades, podría realizar unas determinadas tareas o funciones (aquellas propias de un músculo). Y finalmente, puesto que además es capaz de reaccionar (realizando movimientos de torsión) frente a un estímulo externo (la aplicación de un voltaje), podríamos decir que hemos creado un material inteligente. La fabricación de este hipotético músculo artificial supondría, por tanto, el desarrollo de un nuevo material que es a la vez compuesto, funcional e inteligente.

Por último, entre los nuevos materiales que se están desarrollando actualmente destacan, por la gran importancia que presentan, los nanomateriales. Con este término se designa a aquellos materiales que tienen, al menos, una de sus dimensiones de tamaño nanométrico; constituyendo su síntesis o fabricación una de las ramas más activas de la nanotecnología. Como ya comentamos en el Capítulo 2, las propiedades de un mismo material varían según va disminuyendo el tamaño, pues cada vez se ve más afectado por el aumento de la relación superficie/volumen y por los efectos cuánticos. Por tanto, al fabricar un nuevo material de dimensiones nanométricas formado, por ejemplo, de carbono, éste presentará propiedades nuevas respecto a las que presenta en su forma macroscópica. Si en esta búsqueda de la mejora de sus propiedades se obtuviese un nanomaterial con mayor dureza, resistencia o elasticidad podría aprovecharse para mejorar las prestaciones de los materiales de construcción, generando aplicaciones que hasta hace poco habrían sido inimaginables. Es decir, el control de las propiedades de un nanomaterial gracias al control sobre el tamaño y la forma de sus componentes permite ajustar o «sintonizar» dichas propiedades en un intervalo mayor de valores, proporcionando una mayor versatilidad al material.

¿Sería posible, por ejemplo, descolgar un cable desde un satélite hasta la superficie de la Tierra de manera que sirviese de base para montar un ascensor, como el que puede verse en la Figura 4.1, que permitiese viajar entre el ecuador terrestre y el espacio? Para lograrlo sería esencial, entre otras muchas cosas, disponer de un material con las propiedades precisas para ser utilizado como cable: ligero y a la vez muy resistente pues debe ser capaz de aguantar su propio peso al desplegarse los miles de kilómetros que separan la superficie terrestre de un satélite o estación espacial en órbita geoestacionaria.

La lista de preguntas que se nos pueden ocurrir es interminable, pues basta con dejar libre nuestra imaginación y pensar en todas aquellas aplicaciones con las que hemos podido soñar en un momento dado. ¿Se podrían fabricar pinturas que presenten protección antigraffiti? ¿O materiales cerámicos para bañeras e inodoros con una superficie completamente lisa a escala nanométrica de manera que se mantenga limpia y reluciente con una sola pasada de agua? ¿O un tratamiento para la superficie del papel que lo vuelva impermeable frente a los líquidos pero que permita imprimir sobre él?

¿O recubrimientos que vuelvan invisible un objeto? ¿O ropa que no se manche? Para poder responder a estas preguntas, vamos a explorar algunas de las líneas de investigación actuales que nos permitirán, a su vez, adentrarnos en el fascinante mundo de los nanomateriales que, o bien ya se utilizan, o muy probablemente se utilizarán en el futuro.



FIGURA 4.1. Imagen de un ascensor espacial diseñada por el artista Pat Rawlings para la NASA (http://science1.nasa.gov/science-news/science-atnasa/2000/ast07sep_1/).

4.2. Formas tradicionales de carbono: diamante y grafito

Aunque la visión de la tabla periódica no siempre nos trae recuerdos agradables, pues nos acordamos de cuando nos tocó estudiarla para tal o cual examen de química, es indudable que a cada uno de nosotros, como le ocurría a P. Levi, nos surgen diversas ideas cuando pensamos en los elementos que la componen. El mercurio nos evoca los termómetros con los que nos medían la temperatura durante las largas tardes febriles. El silicio, uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, nos recuerda inmediatamente la gran revolución tecnológica producida en el siglo XX que supuso el nacimiento de la microelectrónica. En el caso del carbono, su asociación a la materia orgánica es inmediata.

El carbono es uno de los átomos más prolíficos que se conocen, pues al combinarse consigo mismo y con otros pocos elementos, como el hidrógeno o el oxígeno, da lugar a varios millones de compuestos. A pesar de la enorme importancia del átomo de carbono en la constitución de la materia orgánica y el papel fundamental que desempeña en los procesos bioquímicos, en el presente capítulo nos ocuparemos de él desde una vertiente distinta. Y es que el átomo de carbono aparece como el protagonista fundamental de una serie de nuevos materiales que presentan unas propiedades químicas y físicas muy adecuadas para hacer de ellos la base de innovadores desarrollos tecnológicos. Aunque, antes de comenzar a describirlos, haremos una breve parada para reflexionar sobre la estructura de dos materiales de carbono, menos novedosos, pero que todos conocemos: el grafito y el diamante.

A pesar de que ambos están constituidos por átomos de carbono, resulta evidente la enorme diferencia que existe, tanto en sus propiedades como en su precio, entre la mina de un lápiz (formada por grafito) y un diamante engarzado en una sortija. Si queremos comprender por qué estos dos materiales presentan propiedades tan distintas, debemos recurrir no a su composición (átomos de carbono), sino a la forma en que estos átomos se encuentran unidos entre sí.

Para comenzar es necesario recordar que los átomos se enlazan unos con otros a través de sus electrones exteriores. En el caso del carbono, los electrones exteriores son cuatro y pueden disponerse en el espacio de diferentes maneras. En la Figura 4.2.A puede verse cómo cada átomo de carbono en el grafito se enlaza muy fuertemente con otros tres átomos de carbono, formando una malla de aspecto hexagonal (como un panel de abeja). Estos átomos que se encuentran en un mismo plano están muy fuertemente

unidos entre sí mediante enlaces covalentes. Sin embargo, los átomos de carbono pertenecientes a planos distintos están unidos mediante un tipo de fuerzas, denominadas de Van der Waals, que son mucho más débiles que los enlaces covalentes. Esta particular estructura, caracterizada por fuertes enlaces dentro de una lámina, pero débiles entre láminas sucesivas, permite explicar las propiedades físicas del grafito. Así, el grafito es un buen conductor de la electricidad en el plano donde los átomos forman hexágonos y muy malo en la dirección perpendicular a éstos. De manera análoga, también presenta una dureza elevada en ese plano pero mucho menor en la dirección perpendicular y por tanto es muy fácil separarlo en láminas (exfoliarlo). Por ese motivo, cuando hacemos un dibujo a lápiz, pequeños fragmentos formados por las láminas más exteriores de la mina se separan, quedando depositadas sobre el papel; aunque como la unión con éste es débil, se puede borrar fácilmente el dibujo arrastrando las láminas con una goma.

En el caso del diamante, los electrones responsables de que cada átomo de carbono forme un enlace con otros se orientan hacia los vértices de un tetraedro dando lugar a la red que puede verse en la Figura 4.2.B. En este caso todos los átomos se encuentran unidos entre sí mediante enlaces covalentes que, como ya hemos mencionado, presentan una gran fortaleza. Esto hace que las propiedades del diamante sean muy distintas a las del grafito aunque ambos se encuentren formados por el mismo tipo de átomos. Así, por ejemplo, el diamante presenta un punto de fusión y una dureza superiores a los del grafito, y además no conduce la electricidad.

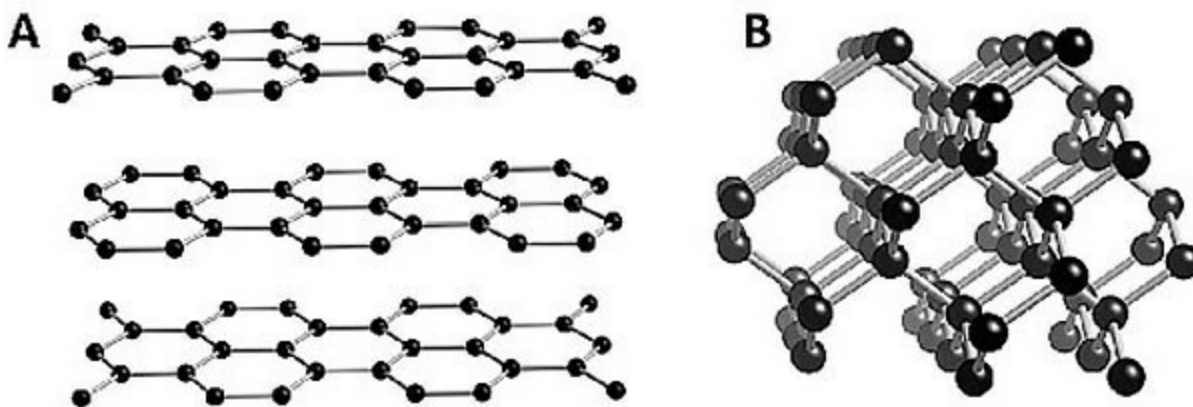


FIGURA 4.2. Disposición de los átomos de carbono en A) el grafito y B) el diamante.

El grafito, junto con el diamante, fueron las dos principales formas alotrópicas del carbono (los mismos átomos pero colocados de diferente manera) conocidas hasta 1980. A partir de ese momento, comenzaron a descubrirse una serie de nanomateriales de carbono que han supuesto una verdadera revolución en el mundo de la

nanotecnología.

4.3. Nuevos materiales de carbono: grafeno, nanotubos de carbono y fullerenos

En la novela de ciencia ficción de Edwin Abbott publicada en el siglo XIX y titulada *Planilandia. Una novela de muchas dimensiones*, un punto, una línea, un cuadrado y una esfera sirven de pretexto al autor para reflexionar acerca de la existencia de distintas dimensiones así como para realizar una crítica de la jerarquía social existente en la época. El protagonista, Cuadrado, habita en un mundo bidimensional (2D) denominado Planilandia. Una noche tiene un sueño en el que visita el mundo unidimensional (1D), Linealandia, e intenta convencer sin éxito al monarca de este reino de la existencia de una segunda dimensión. Cuando días más tarde, Cuadrado recibe la visita de un habitante del mundo tridimensional (3D), llamado Esfera, al igual que le ocurrió a Línea, se muestra reticente a aceptar la existencia de una dimensión superior a la conocida por él. Sin embargo, tras una larga conversación y diversas peripecias, Esfera logra convencerle de que el Universo no se reduce a Planilandia, como él creía, sino que existe una tercera dimensión, lo que a Cuadrado le lleva a pensar que si esto es posible, quizá también lo sería la existencia de una cuarta e incluso una quinta dimensión. Una vez abierta su mente a estas posibilidades, Cuadrado no puede sino sentirse compadecido cuando, junto con Esfera, realiza una visita a Puntilandia, donde el único habitante es un punto, que lo ocupa todo y se encuentra muy satisfecho de sí mismo pues él constituye todo el Universo conocido. Cuando, finalmente, Cuadrado intenta convencer al resto de habitantes de Planilandia de la existencia de otras dimensiones, es encerrado en la prisión acusado de arremeter contra el orden establecido en el mundo bidimensional.

Como bien acaba aprendiendo Cuadrado después de múltiples aventuras, el número de dimensiones es importante ya que las propiedades de los diversos objetos dependen de ellas. También son conscientes de ello tres nanomateriales, recientemente descubiertos, formados exclusivamente por átomos de carbono: el grafeno (2D), los nanotubos de carbono (1D) y los fullerenos (0D), en los que la nomenclatura utilizada indica el número de dimensiones del nanomaterial que se encuentra por encima de la nanoescala, es decir, que son superiores a 100 nm. Estos tres nanomateriales, que habitarían en Planilandia, Linealandia y Puntilandia, respectivamente, se encuentran íntimamente relacionados con un material que acabamos de describir, el grafito (3D).

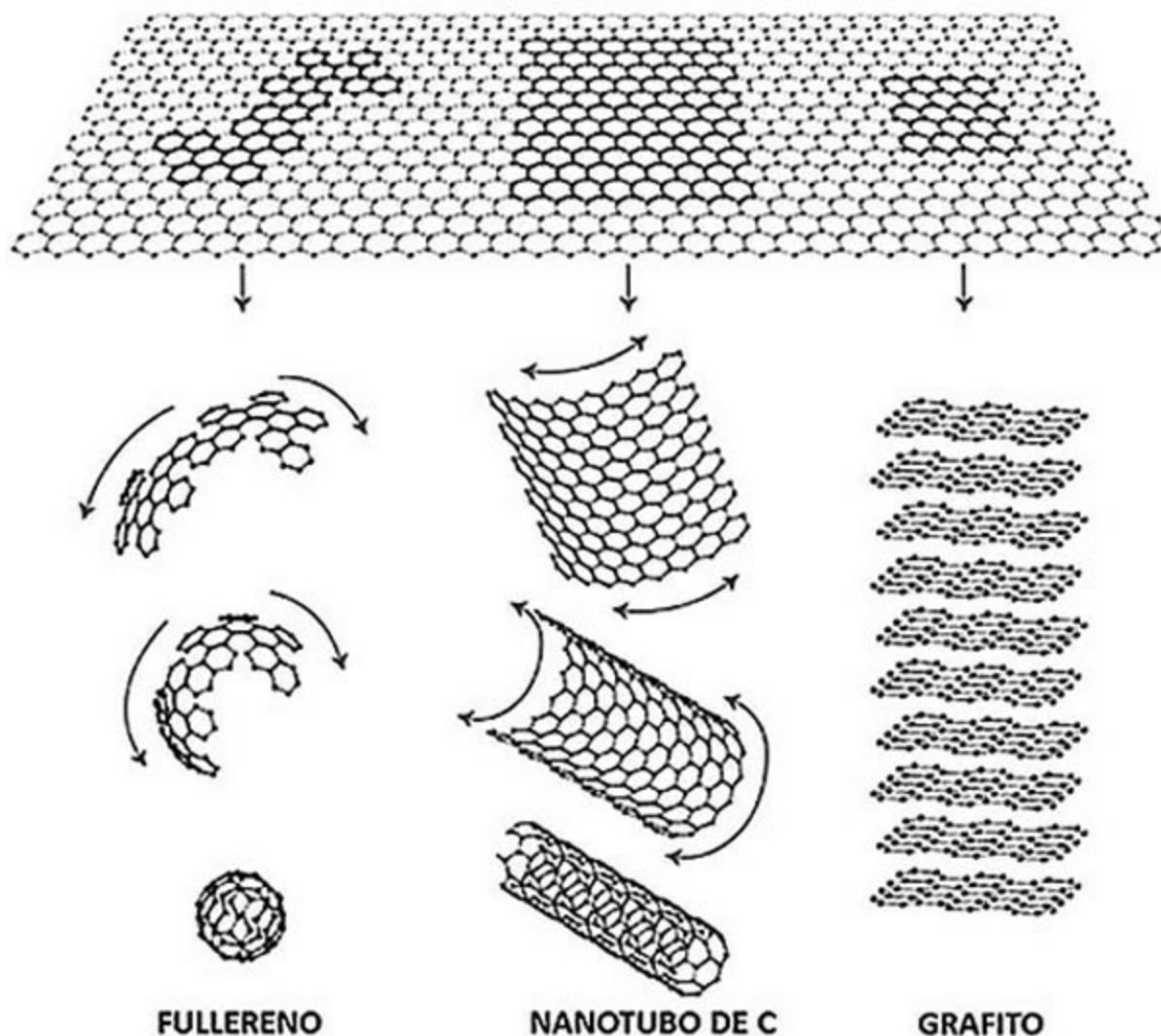


FIGURA 4.3. Estructura de grafeno y cómo a partir de él se podrían generar fullerenos, nanotubos de carbono (si una lámina se enrolla sobre sí misma) o grafito (si se apilan varias láminas). Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd: *Nature Materials*, n.º 6, n.º 183-191. Copyright 2007.

La estructura de todos ellos puede verse en la Figura 4.3. que será comentada a continuación, según vayamos describiendo cada nanomaterial. Aunque los fullerenos fueron descubiertos experimentalmente (1985) antes que los nanotubos de carbono (1991) y éstos que el grafeno (2004), aquí los mostraremos en el orden inverso para facilitar la comprensión.

El Grafeno. En el escenario descrito en *Planilandia*, el grafito pertenecería al mundo tridimensional, pero a él, al contrario de lo que le sucede a Esfera, le resultaría mucho más fácil realizar una visita al mundo bidimensional. Así, si se pega una tira de cinta adhesiva sobre el grafito y se levanta posteriormente se consigue separar las láminas o planos atómicos hexagonales descritos anteriormente. A un único plano atómico de

grafito así obtenido se le denomina grafeno, y es el material más fino existente pues realmente su espesor coincide con el de un solo átomo (Figura 4.3).

En la Figura 4.4.A se muestra una imagen obtenida mediante microscopía de fuerzas atómicas (AFM) de varias láminas de grafeno que han sido depositadas sobre una superficie de silicio. Si en lugar de utilizar la técnica de AFM, obtenemos una imagen mediante microscopía de efecto túnel (STM), que como ya se ha comentado en el Capítulo 3 permite alcanzar resolución atómica, observaremos claramente cómo los átomos de carbono que forman la lámina de grafeno presentan una disposición hexagonal (Figura 4.4.B).

Hasta el momento en que el grafeno fue aislado experimentalmente, lo cual sucedió en el año 2004, no se conocía realmente ningún material autosoportado cuyo espesor fuese monoatómico, pues aunque algunos materiales semiconductores se consideraban sistemas bidimensionales realmente no lo eran, pues, o bien tenían un espesor finito correspondiente a un número pequeño de capas atómicas o, en el caso de estar formados por una única capa, ésta estaba tan fuertemente unida al sustrato que era imposible separarla.

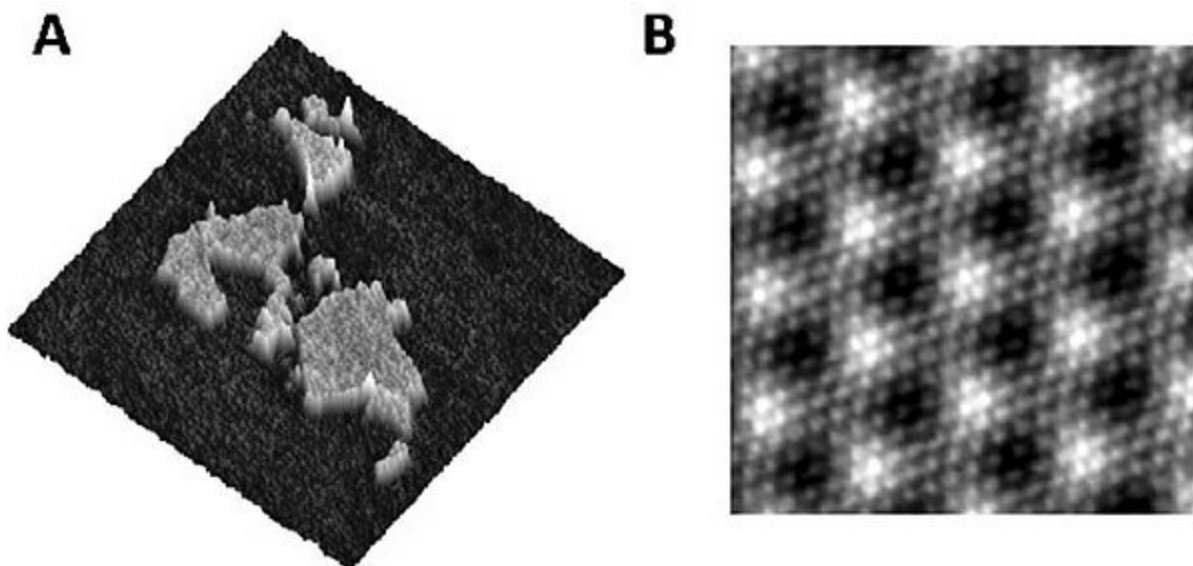


FIGURA 4.4. Láminas de grafeno. A) Imagen de $1.7 \times 1.7 \mu\text{m}^2$ obtenida con un microscopio de AFM y B) imagen de $5 \times 5 \text{nm}^2$ obtenida con un microscopio de STM. Gentileza del Dr. Luis Vázquez y del grupo ESISNA (ICMM-CSIC), respectivamente.

Además de su peculiar estructura, las propiedades que presenta el grafeno son fascinantes, destacando los elevados valores de movilidad electrónica, dureza, flexibilidad, transparencia o estabilidad química. Para hacernos una idea de lo inusual de sus propiedades basta realizar una simple comparación con materiales que todos conocemos: su resistencia es mayor que la del acero, su conductividad eléctrica es

superior a la del cobre y su flexibilidad similar a la del caucho. Un ejemplo de lo que estas propiedades podrían aportar en una aplicación sencilla como, por ejemplo, la fabricación de una hamaca fue dada por A. Geim y K. Novoselov durante el discurso de entrega del Premio Nobel. Si fuese factible construir una hamaca de un metro cuadrado de grafeno, ésta sería capaz de soportar el peso de un gato, con la particularidad de que sería transparente y pesaría menos, no sólo que el propio gato, sino que uno de sus bigotes.

No es, pues, de extrañar que el haber logrado aislar un material realmente bidimensional y poseedor de unas excelentes propiedades haya interesado mucho a científicos de todo el mundo, pero una vez pasada la excitación inicial es necesario dar respuesta a preguntas más prosaicas, por ejemplo, cómo sintetizar grafeno en grandes cantidades y a un precio reducido, cómo manejar una sola capa de átomos o qué nuevas aplicaciones se pueden llegar a generar a partir de este material.

La síntesis de grafeno, hoy por hoy, puede llevarse a cabo mediante diversos métodos. Uno de los más sencillos consiste en exfoliar grafito, es decir, separar láminas de su estructura mediante la utilización de cinta adhesiva. Sin embargo, a la hora de obtener grafeno en grandes cantidades, de una manera rápida y a precios competitivos, queda claro que esta manera tan «artesanal» no es la más adecuada. Una posibilidad muy utilizada en muchos laboratorios es llevar a cabo una síntesis química basada en oxidar previamente el grafito mediante la utilización de los reactivos adecuados y someterlo después a «sonicación», es decir hacerlo vibrar por la aplicación de ultrasonidos. En el grafito oxidado, la presencia de grupos oxigenados hace aumentar la distancia entre las láminas que lo forman, facilitando que éstas se separen completamente. De esta manera se obtienen láminas de grafeno que contienen grupos oxigenados en su estructura, siendo estos grupos eliminados habitualmente mediante reacción con compuestos reductores, como por ejemplo la hidracina. Sin embargo, estos compuestos suelen ser tóxicos, lo que ha motivado que se investigue en la implementación de alternativas «verdes» que sean más sostenibles. Un ejemplo de una de ellas consiste en eliminar los grupos oxigenados, no mediante el empleo de agentes reductores, sino mediante métodos electroquímicos, ganando en rapidez y disminuyendo la cantidad de residuos tóxicos. Otras metodologías totalmente distintas a la descritas, que también son muy utilizadas para la obtención de grafeno «barato» y en grandes cantidades, son las derivadas de la deposición química de vapor (CVD, del inglés *Chemical Vapor Deposition*). Como se describió en el capítulo anterior, en este método se descomponen las moléculas de un gas que contiene carbono sobre una superficie metálica de manera que los átomos de carbono liberados se reorganicen sobre la superficie. Los métodos anteriormente comentados permiten obtener láminas de grafeno

de diferente calidad y de diferente tamaño, siendo más adecuados unos u otros dependiendo de la aplicación a la que vaya a destinarse el nanomaterial. Una vez sintetizadas las láminas de grafeno, el verdadero reto es ser capaz de manipularlas sin romperlas ni alterarlas, de manera que conserven sus propiedades características y puedan ser utilizadas en diversas aplicaciones.

Las posibles aplicaciones del grafeno, derivadas de sus propiedades electrónicas, ópticas, térmicas y mecánicas, se encuadran en campos tan variados como el de la biomedicina, la catálisis, la conversión y almacenamiento de energía, el desarrollo de sensores o la electrónica. Aunque no hay que olvidar que, puesto que de los tres nanomateriales de carbono mencionados, el grafeno ha sido el último que ha podido ser manipulado experimentalmente, sus aplicaciones se encuentran en una fase menos avanzada que las de, por ejemplo, los nanotubos de carbono. Sin embargo, en la actualidad existen importantes iniciativas dirigidas a potenciar la investigación en este campo que hacen prever que el avance en los próximos años va a ser espectacular.

Hoy por hoy el grafeno está siendo utilizado, por ejemplo, para el desarrollo de pantallas táctiles de grandes dimensiones o como refuerzo de ciertas estructuras en la industria aeronáutica. En concreto, en el campo de la electrónica, aparece como un candidato ideal para sustituir al silicio en futuros dispositivos electrónicos debido a la altísima movilidad electrónica y baja resistencia eléctrica que presenta. En este sentido se vaticina que quizá el reemplazo del silicio por el grafeno podría producirse en relativamente pocos años, pues los avances no dejan de sucederse. En el apartado 5.7, donde se describe el estado actual de la nanoelectrónica sin silicio, se profundiza sobre este tema. Por otro lado, la importante aplicación que está encontrando el grafeno en el desarrollo de sensores, como una forma de mejorar las prestaciones de éstos, será comentada en el apartado 6.4.

La gran importancia que este nanomaterial puede tener para la sociedad se refleja en el hecho de que, en el año 2012, la Comisión Europea, a través de la iniciativa denominada *FET FlagShip*, ha destinado mil millones de euros a un proyecto de investigación, (una cantidad sin precedentes para este tipo de iniciativas), que pretende abarcar el estudio del grafeno en su globalidad, incluyendo aspectos tanto de investigación básica como de desarrollo aplicado. En este proyecto participarán, en principio, 126 grupos académicos e industriales, pertenecientes a 17 países europeos entre los que se encuentra España, lo que supone una propuesta para realizar un trabajo de investigación conjunto y coordinado de ámbito europeo sin precedentes.

Los nanotubos de carbono. Siguiendo con nuestro paseo por el mundo de *Planilandia*,

pasaremos ahora del mundo bidimensional del grafeno al mundo unidimensional de los nanotubos de carbono. Como puede verse en la Figura 4.3, para lograrlo basta con enrollar las láminas de grafeno sobre sí mismas, como si se tratase de un póster, hasta obtener unas estructuras prácticamente unidimensionales (de unos pocos nanómetros de diámetro y varios micrómetros de longitud), denominadas nanotubos de carbono de pared sencilla. Si en lugar de una única lámina de grafeno, lo que tenemos son varias láminas enrolladas sobre sí mismas e introducidas unas dentro de otras a la manera de las muñecas rusas, nos encontramos ante un nanotubo de pared múltiple. Además, dependiendo de la orientación con que se enrolle la lámina de grafeno, se generan tres tipos de nanotubos de carbono diferentes (con estructura tipo brazo de silla, zigzag y quiral), los cuales difieren en las propiedades que presentan. Esta estrategia de enrollamiento de una lámina de grafeno es válida para visualizar y comprender la estructura de un nanotubo de carbono, pero no se utiliza como forma de fabricación. De hecho, el primer método de fabricación utilizado se remonta a la Prehistoria, donde los hombres generaban, aunque sin ser conscientes de ello, nanotubos de carbono en las hogueras que utilizaban para calentarse. Resulta curioso pensar que estructuras que han acompañado al hombre desde la época en que éste logró dominar el fuego, no hayan sido observadas experimentalmente hasta el siglo xx. En concreto, se descubrieron en 1991 cuando un investigador japonés, S. Iijima, se encontraba estudiando el depósito de carbono que se obtiene al vaporizar grafito mediante descarga en arco eléctrico. Al realizar el análisis del depósito encontró unos filamentos, de unos pocos nanómetros de diámetro y algunas micras de longitud, que resultaron ser mucho más relevantes de lo que a simple vista parecían, es decir, un desecho pulverizado de carbono.

Hoy en día se sabe que aunque el hollín producido como consecuencia de una combustión contenga nanotubos de carbono, éste no es un método de producción que permita controlar sus características finales, ya que se obtienen estructuras de diferentes longitudes, diámetros y con muchos defectos. Para lograr una síntesis química controlada, los principales métodos que se utilizan actualmente son la deposición química en fase de vapor, la vaporización por láser o la descarga con arcos de carbono. Este último método consiste en provocar una descarga eléctrica entre dos barras de grafito separadas por pocos milímetros. Como consecuencia del aporte energético se evaporan átomos de carbono que, al volver a condensarse, se unen formando nanotubos. En el método de vaporización por láser la idea de partida es la misma, pero en lugar de utilizar una descarga eléctrica para generar los átomos de carbono, se usa un láser de alta potencia que se hace incidir sobre el grafito. Debido a las elevadas temperaturas que se alcanzan en estos dos métodos (que pueden llegar a ser de más de 3000 °C), los nanotubos generados presentan pocos defectos en su

estructura; aunque, por otro lado, la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el proceso es muy grande y el equipo necesario, en el caso de utilizar el láser de alta potencia, costoso. Un método alternativo, en el que se alcanzan menores temperaturas y que permite la producción a escala industrial, es la deposición química en fase de vapor (CVD). En este caso, en lugar de barras de grafito, se utiliza un gas que contiene átomos de carbono enlazados a átomos de hidrógeno (por ejemplo, metano, CH_4) y se introduce en un horno calentado a altas temperaturas (del orden de $1200\text{ }^\circ\text{C}$) que contiene una película fina de un catalizador. Al igual que ocurría en los dos métodos anteriores, como consecuencia del aporte energético (calor), se liberarán átomos de carbono que al recombinarse originarán nanotubos. En este caso el número de defectos estructurales es mayor, pero en contrapartida es un método sencillo, que permite un buen control tanto del diámetro del nanotubo resultante como de su ordenamiento sobre una superficie (por ejemplo, se pueden alinear verticalmente). Dependiendo de qué tipo de nanotubos de carbono se quieran sintetizar (pared única o pared múltiple, con muchos o pocos defectos, largos o cortos, con mayor o menor pureza) se elegirá un método u otro.

La importancia de los nanotubos de carbono radica en las propiedades que presentan. Así, por ejemplo, dependiendo del tipo de nanotubo, éstos poseen diferentes propiedades eléctricas, pudiendo presentar características metálicas o semiconductoras. Y en el caso de ser metálicos, su conductividad es tan alta que son capaces de conducir millones de amperios por centímetro cuadrado. Para hacernos una idea de lo que esto significa, basta pensar que los hilos de cobre usualmente utilizados para transportar la corriente eléctrica se fundirían ante un paso de corriente tan elevado. Esta elevadísima conductividad eléctrica va acompañada de una alta conductividad térmica, es decir, son muy buenos conductores del calor, tal vez de los mejores conocidos hasta hoy.

Estas interesantes propiedades eléctricas y térmicas van acompañadas de otras no menos sorprendentes propiedades mecánicas. Como consecuencia directa de su estructura, formada por átomos ligeros pero unidos entre sí por fuertes enlaces covalentes, este material es unas seis veces menos denso que el acero, pero cien veces más resistente (es decir, presenta una oposición a separarse en dos partes cien veces mayor que un hilo de acero del mismo diámetro). Los nanotubos de carbono tienen también asociada una alta elasticidad, presentando, al igual que un junco que crece junto al río y es azotado por el viento, una gran capacidad para doblarse sin romperse, manteniendo inalterada su estructura interna al recuperar su posición inicial.

Como consecuencia de las propiedades mencionadas, podemos imaginar diversas aplicaciones. Por ejemplo, su utilización como sustitutos de los cables metálicos que

sirven de conectores en diversos dispositivos. Si se intenta reducir el diámetro de un hilo de cobre, aumenta la resistencia al paso de corriente y, por tanto, se genera una gran cantidad de calor que puede llegar incluso a fundir el cable. Si en su lugar se utilizara un nanotubo de carbono se conseguiría no sólo evitar el calentamiento, sino también reducir el diámetro del conector hasta el nanómetro, permitiendo la obtención de dispositivos de tamaño mucho menor. Los nanotubos de carbono permitirán unir el mundo de la electricidad (en el que es necesaria potencia y grandes corrientes eléctricas) con el de la electrónica (pequeños voltajes y pequeñas corrientes).

Los nanotubos de carbono también podrían ayudar en un futuro a resolver el problema de la producción y el almacenamiento de energía, el cual constituye uno de los grandes retos sociales. Así, se está estudiando su uso para almacenar, por ejemplo, hidrógeno, y desarrollar células de combustible (es decir, fuentes de energía eléctrica) o para almacenar litio y desarrollar baterías más pequeñas. El papel de los nanotubos de carbono como catalizadores, es decir, como sustancias que aceleran la velocidad de ciertas reacciones químicas, también está siendo objeto de interés en numerosas investigaciones.

Otras posibles aplicaciones están basadas en la inclusión de nanotubos de carbono en determinados tipos de materiales. De esta manera se logra mejorar las propiedades del material resultante al aportar los nanotubos de carbono sus excelentes propiedades mecánicas. Así, por ejemplo, se han realizado diversos estudios para ver cómo la adición de una determinada cantidad de nanotubos a materiales con base de hierro o aluminio consigue reforzarlos, aumentando su resistencia mecánica. Su inclusión en matrices poliméricas ha dado lugar al desarrollo de materiales compuestos de gran elasticidad y resistencia pero con poco peso, que están siendo utilizados para la fabricación de, por ejemplo, esquís de última generación o parachoques de vehículos. A su vez, su inclusión en fibras de carbono o fibra de vidrio ha permitido construir vigas de alta resistencia pero mucho más ligeras que las fabricadas de hormigón.

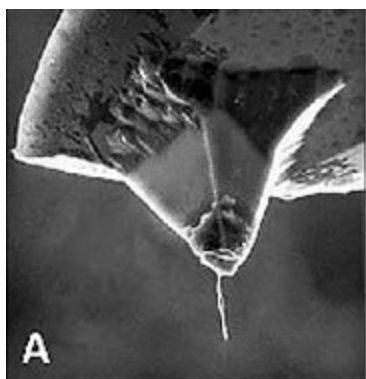


FIGURA 4.5. A) Imagen SEM de una punta de AFM acabada en un nanotubo de carbono. Gentileza del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (autor: P. Rice), B) Logotipo de la edición de 2004 del congreso Trends in NanoTechnology escrito utilizando nanotubos de carbono y visualizado por SEM. Gentileza de la Fundación Phantoms y K. Teo (Universidad de Cambridge, Reino Unido).

Por último destacaremos su uso en la producción de pantallas planas o su utilidad para fabricar puntas de AFM mucho más afiladas y duraderas. De hecho, muchos investigadores están comenzando a trabajar con puntas que acaban en un único nanotubo de carbono, como la que se muestra en la Figura 4.5.A. En la Figura 4.5.B puede verse un ejemplo de nanotubos de carbono que han sido manipulados y dispuestos de una determinada manera con el objetivo de escribir «TNT2004», que es el logotipo de uno de los congresos internacionales más importantes en nanotecnología, organizado por la Fundación Phantoms, una entidad privada española. Esta imagen, en la que se observan nanotubos de carbono dispuestos perpendicularmente a la superficie sobre la que se han depositado, se ha obtenido utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM).

Como se puede intuir por los ejemplos mencionados, las posibles aplicaciones de los nanotubos de carbono suponen un campo tan fascinante que en la actualidad numerosos grupos de científicos de todo el mundo se encuentran investigando sobre ello. Para hacernos una idea del trabajo que se lleva a cabo en estos laboratorios de investigación que tan alejados se encuentran de nuestro día a día, comentaremos a continuación algunos ejemplos que pondrán en evidencia cómo a partir de lo que sabemos sobre las propiedades y el comportamiento de los nanotubos de carbono, se pueden diseñar diferentes experimentos que tienen como objetivo probar la utilidad de estas nanoestructuras en las más dispares aplicaciones. Así, J. C. Grossman y A. M. Kolpak del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts, EE.UU.) han desarrollado recientemente una estrategia para el almacenamiento de energía solar. Está basada en la modificación de nanotubos de carbono con una molécula orgánica (denominada azobenceno) que es capaz de absorber energía del sol pasando a un estado de energía superior, en el cual permanece hasta que por efecto de algún estímulo externo (por ejemplo, calor, luz, aplicación de un voltaje) vuelve al estado de energía inferior, liberando la energía acumulada y dejando el dispositivo listo para volver a empezar. La nanoestructura híbrida resultante de la combinación de los nanotubos de carbono y el azobenceno presenta una gran capacidad de almacenamiento de energía, así como una gran estabilidad en el tiempo.

Otro ejemplo, relativo al tipo de investigaciones que se están llevando a cabo actualmente sobre las posibles aplicaciones de los nanotubos de carbono, consiste en utilizarlos para obtener materiales capaces de conducir la corriente eléctrica y que además sean flexibles permitiendo que se les doble, retuerza, estire o pliegue sin que

sus propiedades varíen. El desarrollo de este tipo de materiales sería de gran interés pues no sólo abriría las puertas al desarrollo de dispositivos electrónicos flexibles, sino que también facilitaría la creación de los músculos artificiales de los que hablábamos al principio del capítulo o de sensores de diagnóstico acoplables a la piel. En este sentido, Y. Zhu y colaboradores, investigadores de la Universidad Estatal de Carolina del Norte (EE.UU.), han desarrollado un método para crear conductores a partir de cintas de nanotubos de carbono recubiertos con una fina película de oro y paladio, y un polímero elástico. Estos conductores fueron utilizados por los investigadores junto con un diodo emisor de luz (LED, del inglés *light emitting diode*) y una pila para construir el circuito que puede verse en la Figura 4.6., con el objetivo de determinar si, además de ser flexibles, poseían la propiedad de seguir transmitiendo señales eléctricas al estar sometidos a una torsión mecánica. La experiencia permitió concluir que la intensidad de luz emitida por el diodo no varía al estirar, plegar o retorcer estos conductores.

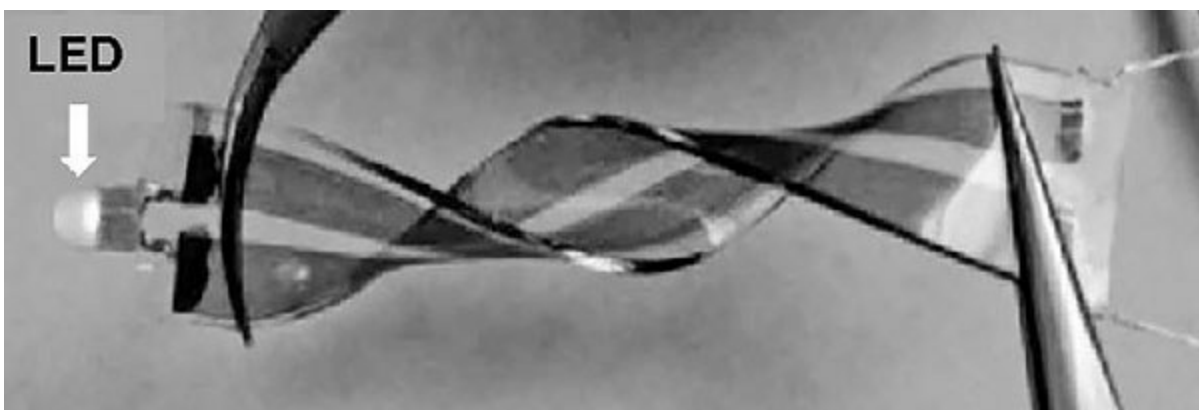


FIGURA 4.6. Fotografía de parte de un circuito (constituido por un diodo emisor de luz LED y dos conductores elásticos creados a partir de cintas de nanotubos de carbono) que puede ser retorcido sin que el diodo se apague. Reproducido con permiso de *Advanced Functional Materials*, n.º 22, pp. 1279-1283. Copyright 2012 Wiley.

Un tercer ejemplo de las diferentes posibilidades de aplicación que presentan los nanotubos de carbono es el trabajo realizado por J. Guo y colaboradores de la Universidad de Michigan (EE.UU.), que han conseguido utilizarlos para camuflar objetos tridimensionales gracias a las inusuales propiedades ópticas que presentan. Los investigadores han demostrado cómo al recubrir un objeto con un «bosque» de nanotubos de carbono se logra una absorción perfecta de la luz incidente. Al no haber prácticamente luz reflejada por el objeto, éste se vuelve invisible pues no es posible detectarlo visualmente. Veamos cómo llevaron a cabo el experimento. En primer lugar, fabricaron la imagen de un tanque de $65 \times 22 \mu\text{m}^2$ utilizando una placa de silicio de $500 \mu\text{m}$ de espesor mediante la técnica FIB (del inglés *focused ion beam*), que ya fue descrita en el Capítulo 3. Un objeto tan pequeño no puede verse a simple vista, pero

utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) obtuvieron la imagen representada en la Figura 4.7.A.

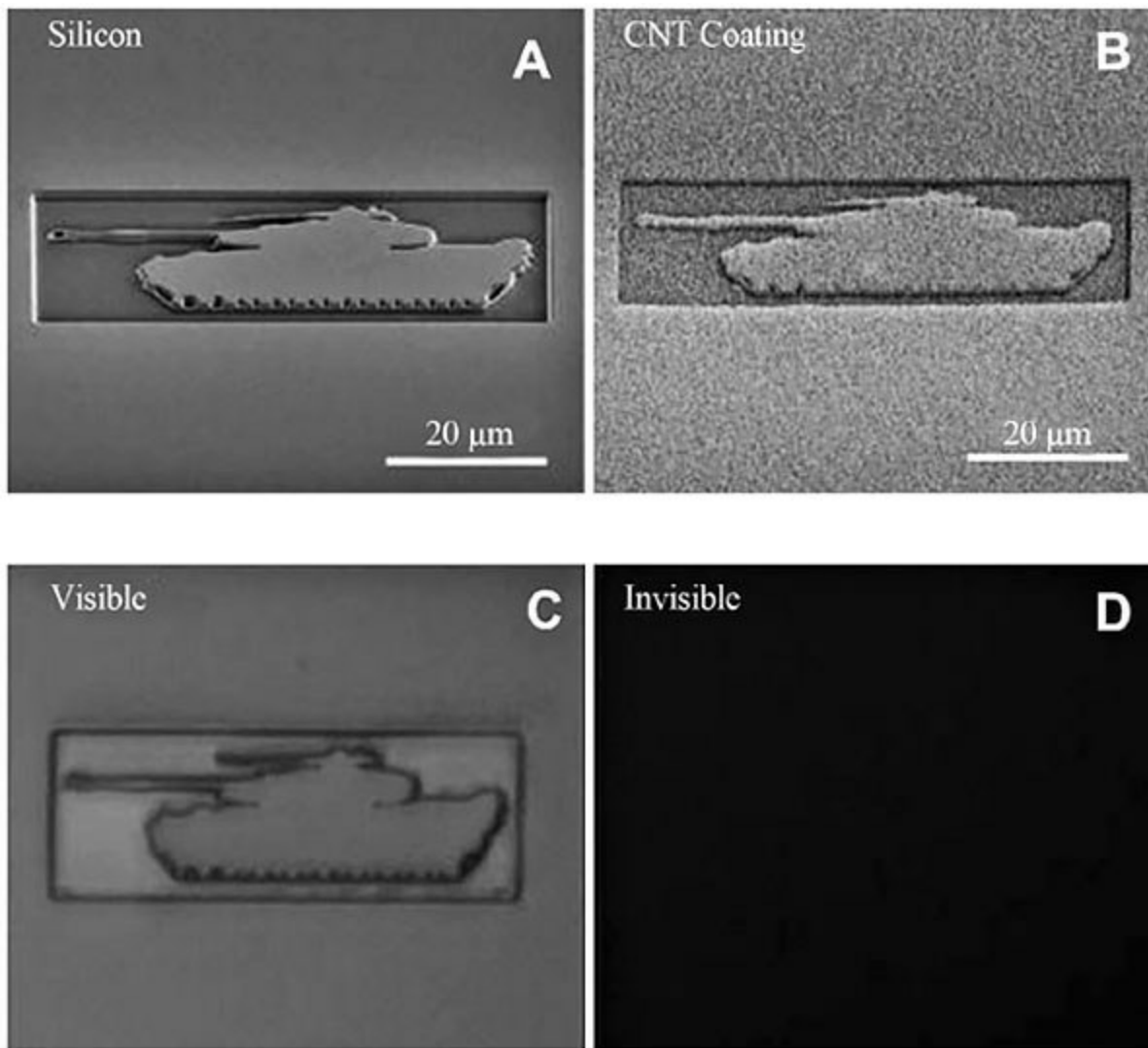


FIGURA 4.7. Imágenes de un tanque fabricado por FIB sobre una placa de silicio, obtenidas con A) un microscopio electrónico de barrido y C) un microscopio óptico. Imágenes del mismo tanque, pero ahora recubierto con un bosque de nanotubos de carbono, obtenidas con B) un microscopio electrónico de barrido y D) un microscopio óptico. Reproducido con permiso de *Applied Physics Letters*, n.º 99, 211 103. Copyright 2011 AIP Publishing LLC.

La imagen del mismo objeto fue obtenida de nuevo, pero esta vez utilizando un microscopio óptico. Para ello se iluminó el tanque con luz y se recogió la luz reflejada, obteniéndose la imagen que puede verse en la Figura 4.7.C. Como era de esperar, en este caso es posible observar el objeto tanto por microscopía electrónica como por microscopía óptica. A continuación, y con el fin de ocultar el objeto a la vista, los investigadores depositaron sobre él nanotubos de carbono alineados verticalmente. Al volver a observar la placa con un microscopio electrónico, obtuvieron la imagen que se presenta en la Figura 4.7.B. Sin embargo, al observarla utilizando un microscopio

óptico pudieron comprobar cómo el bosque de nanotubos de carbono había vuelto invisible la figura del tanque (Figura 4.7.D), pues como se ha mencionado anteriormente, éstos absorben completamente la luz que les llega. A la vista de estos resultados, el bosque de nanotubos de carbono podría utilizarse como un «velo mágico» que haría que el objeto fuese indetectable para nuestra vista.

A raíz de lo expuesto hasta el momento, no es difícil comprender por qué los nanotubos de carbono constituyen una de las grandes apuestas de la nanotecnología actual, haciéndonos soñar con que en un futuro no muy lejano, estos materiales estén presentes en numerosos campos. Para lograr este objetivo, y que las diferentes aplicaciones se conviertan en una realidad, es evidente que todavía quedan múltiples aspectos por solucionar. Por un lado, al igual que ocurría en el caso del grafeno, resulta indispensable disponer de métodos que permitan su fabricación con alta pureza, a un precio razonable y en grandes cantidades. Aunque, hoy en día, los rendimientos son todavía bajos y el precio elevado, continuamente se abren nuevas fábricas en todo el mundo que poco a poco van logrando abaratar su coste. Por otro lado, existen todavía problemas básicos que si se consiguiesen resolver permitirían un gran avance, como por ejemplo, el poder manipularlos individualmente y colocarlos en determinadas posiciones de una manera sencilla y rápida. Las posibilidades que esto abriría en, por ejemplo, el campo de la electrónica son evidentes. Finalmente, no hay que olvidar que, como se verá en el Capítulo 8, actualmente hay un debate abierto en la sociedad sobre los potenciales riesgos que puede entrañar la manipulación de la materia en la escala nanométrica. No debemos dejarnos cegar por los éxitos cosechados hasta el momento por la nanotecnología o por las enormes posibilidades que parecen abrirse ante nosotros, sin profundizar en esta cuestión. Es, por tanto, esencial que los avances que se están produciendo vayan acompañados por estudios rigurosos que permitan conocer con exactitud los potenciales riesgos que puede suponer la fabricación, la manipulación y el uso no sólo de los nanotubos de carbono, sino de cualquier otro nanomaterial.

Los fullerenos. Por último, imaginemos que el grafeno, en su viaje a través de las tres dimensiones, decide salir a pasear por Puntilandia. Como puede verse en la Figura 4.3, para ello le bastaría con enrollarse sobre sí mismo de tal manera que resultase una estructura cerrada. Se habría generado un fullereno, es decir, una molécula poliédrica formada por una combinación de hexágonos y pentágonos. De todas las posibles estructuras que pueden obtenerse de esta manera, la más estable se denomina C_{60} y tiene la forma que puede verse en la Figura 4.8.A. Si nos fijamos, vemos que esta típica estructura que solemos encontrar en cualquier parque de juegos infantil está formada

por 12 pentágonos y 20 hexágonos, siendo el número de intersecciones entre ellos 60. Pues bien, si en cada una de esas intersecciones hubiese un átomo de carbono y su tamaño se hubiese reducido 1000 millones de veces, estaríamos ante el fullereno C_{60} . Como adelantábamos en el Capítulo 2, esta diferencia de tamaños es aproximadamente la misma que hay entre la Tierra y la imagen de la figura. La estructura del C_{60} también es similar a la de los típicos balones de fútbol con pentágonos negros sobre fondo blanco que todos conocemos, así como a las cúpulas geodésicas diseñadas por el inventor y arquitecto Richard Buckminster Fuller, utilizadas en múltiples edificios en todo el mundo. Justamente esta similitud es lo que originó que estas moléculas fuesen denominadas buckminsterfullerenos o simplemente fullerenos.

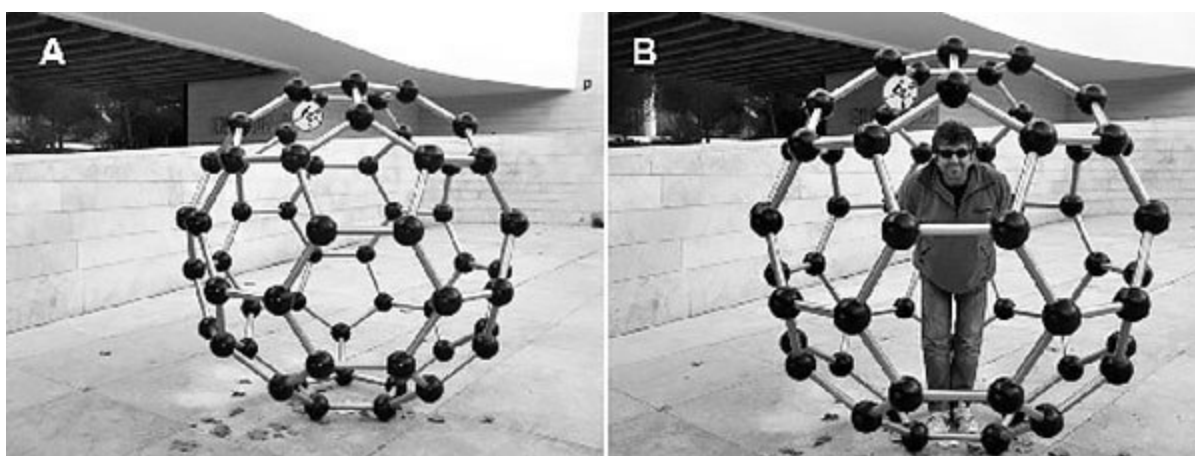


FIGURA 4.8. A) Fotografía de un icosaedro truncado en un parque infantil representando la estructura atómica de un fullereno (C_{60}). B) Ejemplo de una «molécula» encapsulada dentro de ese «fullereno».

Los fullerenos fueron descubiertos experimentalmente en 1985, de manera casual, cuando H. Kroto, R. F. Curl y R. Smalley estaban realizando experimentos sobre el polvo interestelar. Se confirmó así la existencia de una molécula sobre la que E. Osawa había hecho predicciones teóricas en los años setenta aunque, quizá debido a que publicó su teoría en japonés, no obtuvo mucha difusión. El descubrimiento de H. Kroto y sus colaboradores, en cambio, tuvo una enorme repercusión: la molécula de C_{60} fue nombrada molécula del año en 1991 en la revista *Science*, a ellos se les concedió el Premio Nobel de Química en 1996, y H. Kroto fue nombrado *sir* por la reina Isabel II de Inglaterra.

Actualmente se conocen muchas variantes de estas moléculas cerradas sobre sí mismas, diferenciándose entre ellas en el número de átomos de carbono. Entre las más conocidas podemos mencionar el C_{70} , C_{48} o C_{34} aunque, sin embargo, otras no se han podido sintetizar. Al igual que ocurría con los nanotubos de carbono, su formación espontánea se produce fácilmente, obteniéndose como producto en cualquier

combustión. Para realizar la síntesis *controlada* de fullerenos, es decir, para lograr producir sólo estas moléculas y todas del mismo tamaño, pueden utilizarse diversas técnicas. En concreto en 1990 se optimizó un método de vaporización de grafito por descarga en arco eléctrico para obtener fullerenos en grandes cantidades, motivando que éstos pasasen a ser realmente compuestos manejables y, por tanto, objeto de estudio por parte de la comunidad científica.

Al igual que en los casos anteriores, las aplicaciones nanotecnológicas que se pueden derivar del uso de esta molécula son muy variadas, encontrándose muchas de ellas todavía en fase de estudio. Puesto que han sido dados numerosos ejemplos para el caso de los nanotubos de carbono, nos centraremos aquí únicamente en la aplicación de los fullerenos a los campos de la electrónica y de la biomedicina. Por una parte, son un componente fundamental de lo que se conoce como electrónica molecular ya que, como veremos en el Capítulo 5, pueden ser utilizados como base para sintetizar sistemas que posean propiedades rectificadoras interesantes para la creación de nuevos dispositivos. Por otra parte, al ser moléculas rígidas, pueden unirse a biomoléculas sin sufrir deformaciones, por ejemplo al sitio activo de una proteína o al receptor de membrana que utiliza un virus para entrar en su célula diana. Otra interesante aplicación está relacionada con que en su interior pueden encerrarse átomos o pequeñas moléculas (ver el ejemplo de la Figura 4.8.B), como por ejemplo gadolinio. Este elemento, gracias a sus propiedades magnéticas, aumenta la señal en los estudios de resonancia magnética nuclear utilizados en la detección de células tumorales.

Un descubrimiento curioso acerca de los fullerenos fue realizado recientemente usando el telescopio Spitzer de la NASA. En el curso de sus observaciones, un grupo de astrónomos encontraron, cerca de las estrellas «XX Ophiuchi» (distantes 6500 años-luz de la Tierra), un elevado número de diminutas partículas sólidas, que resultaron estar compuestas por moléculas de C_{60} . Hasta ese momento, en el cosmos únicamente se habían encontrado fullerenos en fase gaseosa, siendo la primera vez que se observaba su existencia en el espacio en fase sólida. Además, el número de fullerenos detectados fue tal que podría formarse con ellos el equivalente a 10 000 montes Everest. Para entender cómo pueden formarse este tipo de estructuras, podemos recurrir a las palabras de uno de los descubridores, N. Evans; de la Universidad de Keele, en Inglaterra: «los fullerenos se apilan unos sobre otros de la misma manera que se apilarían naranjas en una cesta hasta constituir las partículas sólidas detectadas. Éstas son minúsculas, mucho más pequeñas que la anchura de un cabello, pero cada una puede contener millones de *buckybolas* apiladas». Además de los fullerenos descritos hasta el momento, también se han hallado evidencias de otros más complejos (por

ejemplo, C_{240} conteniendo en su interior C_{60}) en los alrededores de nebulosas planetarias. A su vez, en los alrededores de estrellas que se extinguen y supernovas se han encontrado moléculas consistentes en varios anillos de carbono unidos entre sí, conocidas como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs). Y es que el espacio es una inmensa factoría de moléculas de distintas clases y tamaños. El mecanismo que permite la existencia de esta gran diversidad química es, hasta hoy, desconocido pues los datos son muy escasos y de difícil interpretación. La reciente inauguración de ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), en el desierto de Atacama, ha supuesto una mejora en los radiotelescopios actuales, confirmando que existen en el espacio muchas más especies químicas de las que pensábamos. Por otra parte, los nuevos telescopios en órbita nos muestran que el espacio interestelar no sólo está poblado por moléculas, grandes o pequeñas, sino también por nanopartículas (conocidas como polvo cósmico).

Para ayudar a entender los procesos que han dado lugar a esta gran variedad química, la Unión Europea ha concedido recientemente uno de los contratos denominados *ERC-Synergy Grant* dotado con 15 millones de euros para realizar, entre otras cosas, experimentos de simulación con técnicas de nanociencia que permitan comprender el proceso de formación del polvo cósmico. Este proyecto, que combina lo más grande y lo más pequeño, se denomina NANOCOSMOS e involucra a dos grupos del CSIC y uno del CNRS (Francia). Los investigadores integrantes del proyecto construirán varias cámaras de simulación en las que intentarán reproducir, en un laboratorio, la atmósfera que existe alrededor de algunas estrellas, pues es ahí donde se forman los granos de polvo interestelar. Para avanzar en la comprensión del Universo, es importante dilucidar cómo se produce este proceso ya que estos granos de polvo, al cabo de millones de años, acaban formando parte de nuevas nubes interestelares donde nacerán estrellas y también planetas, algunos rocosos como la Tierra. Por algo se dice que no somos más que «polvo de estrellas».

Hasta el momento hemos comentado algunas de las posibles aplicaciones de tres nanomateriales de carbono que son fundamentales para la nanotecnología: el grafeno, los nanotubos de carbono y los fullerenos. Sin embargo, y a pesar de lo prometedor de los resultados que se están obteniendo, no hay que olvidar que la mayor parte de las aplicaciones actuales, excepto aquellas en las que el nanomaterial se utiliza como elemento pasivo, se encuentran en fase de estudio. Es decir, muchas de las ideas expuestas son todavía propuestas sobre las que se está estudiando su viabilidad.

4.4. El variado mundo de los nanocomposites

Los composites son un tipo de materiales que ha suscitado un gran interés en los últimos años debido a las interesantes propiedades que presentan y a sus múltiples aplicaciones. Aunque la traducción en español es material compuesto, el término *composite* es el que se utiliza prácticamente en cualquier texto científico, independientemente del idioma.

Como puede intuirse a partir de su nombre, con este término se designa a un tipo de material formado por, al menos, dos fases sólidas: una continua (la matriz), y otra dispersa en ella (el refuerzo). Puesto que la naturaleza tanto de la matriz como de la fase dispersa puede ser muy variada, las propiedades finales de los composites que se obtienen también pueden ser muy diferentes. Un ejemplo típico de composite es el formado por un polímero orgánico (normalmente sintético) y un sólido inorgánico, lo que origina un material híbrido orgánico-inorgánico, donde la contribución individual de cada componente, así como el resultado de la interacción entre ambos, va a conducir a la obtención de un material con propiedades mejoradas respecto a las que exhiben sus componentes individuales.

Para continuar adentrándonos en el fascinante mundo de este tipo de materiales, veremos un ejemplo de material híbrido orgánico-inorgánico («el azul maya») que, por un lado nos servirá para comprender mejor su estructura y, por otro, nos demostrará que a pesar de denominarse «nuevos materiales», en realidad son conocidos desde la antigüedad. Sin embargo, y al igual que ha ocurrido con los nanotubos de carbono, su estructura no ha podido dilucidarse hasta la aparición de las modernas técnicas de análisis.

A mediados del siglo XX tuvo lugar un importante descubrimiento arqueológico en el estado de Chiapas (México): Bonampak, un antiguo emplazamiento maya rodeado por la selva. En este emplazamiento se encontraron restos de pinturas murales, en las que llamaba poderosamente la atención el brillante color azul que aparecía en ellas. Esta coloración tan vistosa la proporciona el pigmento conocido como «azul maya», pues fue muy utilizado por esta civilización que lo elaboraba a partir del índigo o añil (un colorante orgánico natural) obtenido de ciertas plantas tropicales. Este pigmento presenta la particularidad de que ha sido capaz de resistir más de doce siglos en un entorno selvático sin prácticamente degradarse. Este hecho parece extraño pues los colorantes orgánicos naturales suelen ser muy sensibles a la acción de los agentes

ambientales (calor, luz, humedad o ataque químico ambiental). ¿Cómo ha conseguido el color mantenerse inalterado con el paso del tiempo? La respuesta ha venido de la mano de modernas técnicas de análisis que han permitido averiguar que, en realidad, el «azul maya» no está únicamente formado por el colorante orgánico (índigo), sino que éste se encuentra atrapado en la red de canales de un mineral arcilloso (la paligorskita). La «síntesis» de un material tan particular fue realizada por los mayas sin saberlo, pues una vez extraído el índigo de las hojas, lo sometían a un proceso de lavado con aguas ricas en paligorskita. Se cree que durante el proceso de lavado, el índigo se introducía en los huecos de tamaño nanométrico de la arcilla, donde quedaba protegido. Así se conseguía un pigmento que presentaba unas propiedades mejoradas respecto a la de sus componentes individuales: al color azul intenso (proporcionado por el índigo) se le unía una enorme resistencia al ataque ambiental y una gran estabilidad (aportadas por el mineral).

En la actualidad muchos laboratorios del mundo intentan conseguir lo que ya lograron los mayas en el siglo VIII: el diseño de nuevos materiales que presenten propiedades diferentes y mejoradas respecto a las de sus constituyentes. Hoy en día, ese diseño es fruto de la investigación científica y no de la casualidad. En este sentido, un avance importante ha sido el desarrollo de nanocomposites, es decir de composites en los que uno de sus constituyentes presenta al menos una dimensión en la escala nanométrica.

En los nanocomposites, debido a la naturaleza nanométrica de alguno de sus componentes, se incrementa el número de interacciones entre las fases y como consecuencia el efecto sinérgico producido, lo que conduce a materiales con propiedades mejoradas respecto a los microcomposites. Como resultado de sus excelentes propiedades, este tipo de compuestos ha encontrado múltiples aplicaciones en diversos campos. Así por ejemplo, pueden servir como material de construcción de la carrocería de automóviles y del fuselaje de aviones debido a sus mejoradas propiedades mecánicas o como material de envasado si nos atenemos a su capacidad para constituir una barrera impermeable al paso de gases.

Una derivación novedosa es aquella en la que el polímero sintético derivado del petróleo es sustituido por uno de origen natural (biopolímero), dando lugar a un bionanocomposite. El desarrollo de este tipo de compuestos está en consonancia con la tendencia actual de dirigirse hacia una «química verde», más respetuosa con el medioambiente, ya que la utilización de polímeros naturales facilita enormemente la eliminación de residuos.

Los bionanocomposites han encontrado una clara aplicación en el área de la biomedicina, por ejemplo para transportar y liberar fármacos de manera controlada o

como soportes en la regeneración de tejidos. En este sentido, no cabe duda de que la ingeniería de tejidos constituye un campo de investigación, altamente interdisciplinar, en el que el diseño de materiales con propiedades específicas (en cuanto a, por ejemplo, forma, tamaño y porosidad) desempeña un papel primordial. Estos materiales, que serán utilizados como soportes para el crecimiento celular pues favorecerán la creación de un nuevo tejido, deben ser biocompatibles (de manera que no se genere ninguna reacción adversa al organismo), biodegradables (deben ir transformándose, una vez formado el nuevo tejido, en productos que sean fácilmente eliminables en las condiciones fisiológicas) y, por supuesto, no tóxicos. A la vista de estas características, los bionanocomposites son materiales idóneos para servir de soportes en la regeneración de tejidos, pues a las propiedades habituales de los nanocomposites convencionales se unen la biodegradabilidad y biocompatibilidad aportadas por el polímero natural. Por ejemplo, en el caso de la regeneración de tejidos óseos son muy utilizados los materiales compuestos por hidroxapatito y polímeros como el colágeno o la quitina, que intentan imitar la composición del hueso. En este caso, además de obtenerse un material final con una porosidad y unas propiedades mecánicas adecuadas para ser utilizado como soporte artificial, la nanoestructuración de los componentes hace que se obtenga una rugosidad en la escala nanométrica similar a la del hueso natural, favoreciéndose la regeneración del tejido.

Otra importante aplicación de los bionanocomposites es su utilización como bioplásticos. En estos casos, el polímero natural que se utiliza como base suele derivar de productos naturales tan habituales para nosotros como la patata o el maíz. En cuanto al refuerzo, numerosos estudios han demostrado que la utilización de sólidos inorgánicos (por ejemplo, arcillas naturales) logra conferir al material resultante propiedades mejoradas respecto al polímero natural. En este caso concreto, las interacciones en el nivel nanométrico que se establecen entre ambos componentes permiten la obtención de un material más estable frente a la degradación térmica, más rígido y que presenta una mayor capacidad para impedir el paso de gases a través de él. Puesto que además es biodegradable, se paliaría el gran impacto ambiental que acompaña a la utilización de plásticos convencionales. Todas estas características hacen que este material sea idóneo para sustituir a los plásticos convencionales en el envasado de alimentos o en campos como la agricultura o la construcción. Sin embargo, a pesar de las ventajas que presentan, todavía queda mucho camino por recorrer para que los bioplásticos sustituyan a los plásticos derivados del petróleo pues su precio es entre cuatro y cinco veces superior. Es fundamental, por tanto, que la investigación avance, ofreciendo cada vez más productos, con mejores propiedades y un menor precio. En este sentido, cabe ser optimista pues, según las conclusiones publicadas por

European Bioplastics (asociación que agrupa a distintos productores), se estima que el mercado de bioplásticos en Europa quintuplicará su tamaño en cinco años.

4.5. Los intrincados pasadizos de los materiales nanoporosos

Otro tipo de materiales, cuya síntesis despierta un enorme interés en la investigación actual, son los materiales porosos. Teniendo en cuenta el origen griego de la palabra poro, que significa pasadizo, resulta fácil imaginar la estructura de este tipo de materiales e incluso anticipar alguna de sus posibles aplicaciones, pues a través de dichos pasadizos puede producirse el paso de moléculas.

La clasificación de los materiales porosos puede realizarse atendiendo a diversos criterios, como el método de producción, la morfología o el tamaño del poro. Si tenemos en cuenta las posibles aplicaciones del material, la clasificación más útil es ésta última. Así, dependiendo del tamaño del poro, la IUPAC (*Unión Internacional de Química Pura y Aplicada*) clasifica los materiales porosos en tres grupos: materiales microporosos (tamaño de poro inferior a 2 nm), materiales mesoporosos (tamaño de poro entre 2 y 50 nm) y materiales macroporosos (tamaño de poro superior a 50 nm). Puesto que esta clasificación parece contradecir la definición de «nano», conviene aclarar que actualmente se denominan materiales nanoporosos a aquellos que presentan un tamaño de poro inferior a 100 nm. En cuanto a la morfología del poro existen dos posibilidades: que los poros estén conectados con el exterior (poros abiertos) o que no lo estén (poros cerrados), lo cual evidentemente también va a influir en la aplicación a la que puede destinarse el material.

Obviamente, las principales aplicaciones de estos materiales son consecuencia de la presencia de poros en su estructura. En concreto, una estructura porosa presenta una menor densidad y un área superficial específica mucho mayor que una estructura similar pero sin poros, siendo esta última propiedad fundamental para que estos materiales puedan ser utilizados como catalizadores. Otras posibles aplicaciones, como veremos a continuación, están relacionadas con su uso como adsorbentes de líquidos o gases, como tamices moleculares o como vehículos para llevar a cabo un reconocimiento molecular.

Entre los materiales microporosos más interesantes se encuentran las zeolitas, que son minerales conocidos desde el siglo XVIII, cuyo nombre, derivado de dos términos griegos «zeo» (hervir) y «lithos» (piedra), se debe a que parecen hervir al ser calentados a la llama. Tras su descubrimiento se comprobó que estos materiales eran

capaces de retener de manera selectiva ciertas sustancias ya que, debido al pequeño tamaño del poro, algunas moléculas pueden atravesarlos quedando adsorbidas dentro, pero otras no. Las zeolitas son, por tanto, capaces de actuar como un tamiz molecular, lo que vendría a ser algo similar a un filtro, aunque más sofisticado pues su funcionamiento se produce en el nivel molecular.

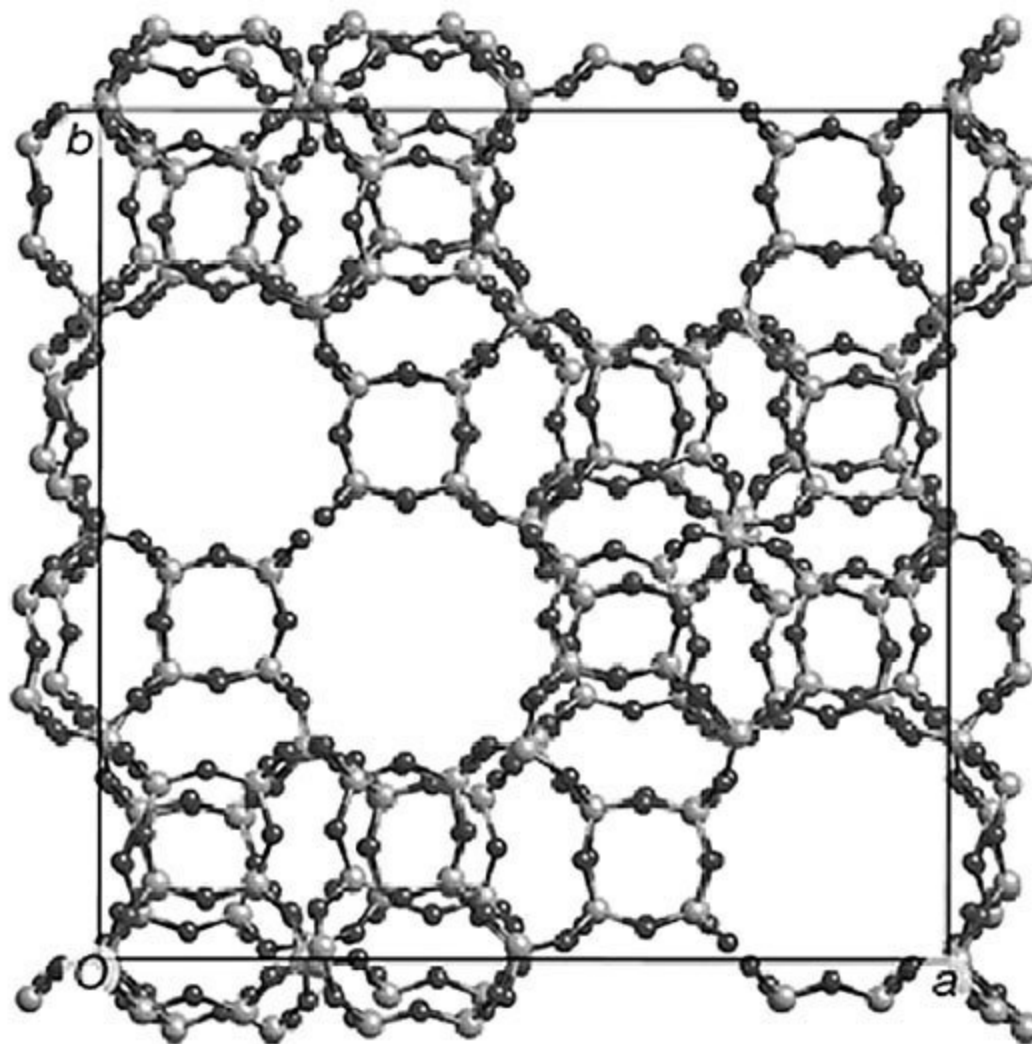


FIGURA 4.9. Estructura de la zeolita ITQ-37. Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, n.º 458, pp. 1154-1158. Copyright 2009.

Desde que, a mediados del siglo XX, se consiguiese sintetizar en el laboratorio la primera zeolita artificial, el avance ha sido significativo, y existen en la actualidad cerca de 200 zeolitas sintéticas distintas que reciben nombres como ZSM5, MCM9 o ITQ-15.

Una zeolita típica está formada por unidades tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 unidas entre sí por los átomos de oxígeno de los vértices de manera que se originan poros de tamaño molecular. La estructura así formada presenta una cierta carga negativa, que es

compensada gracias a la presencia de cationes que se sitúan en el interior de los poros. Estos cationes tienen una gran movilidad y, gracias a esta propiedad, las zeolitas tienen una notable aplicabilidad como intercambiadores de cationes pudiendo, por ejemplo, «ablandar» un agua. Las aguas denominadas «duras» poseen un alto contenido en calcio y magnesio, y pueden originar algunos problemas en los electrodomésticos por cuyas tuberías circulan, ya que van produciendo depósitos e incrustaciones en ellas. Al poner en contacto zeolitas con este tipo de aguas se produce un intercambio entre los cationes de la zeolita (por ejemplo, potasio y sodio) y los del agua (calcio y magnesio), lográndose así que el agua se ablande. De la misma manera, es posible utilizar las zeolitas para eliminar residuos contenidos en aguas, como por ejemplo metales pesados, que pasarían de estar en el agua a quedar atrapados en la red del material.

Por último, las zeolitas encuentran una gran aplicación como catalizadores, siendo ampliamente utilizadas en la industria, por ejemplo, en procesos petroquímicos para lograr la obtención de gasolina a partir del petróleo crudo. Para hacernos una idea de la enorme eficacia que presentan respecto a otros catalizadores convencionales, basta con pensar que la extensa red de canales repletos de centros activos de una muestra de zeolita de 1 gramo equivale a disponer de una superficie de cientos de metros cuadrados. Algo así como si en el interior de 1 gramo de zeolita pudiese encontrarse un campo de fútbol. Además, otra propiedad destacable de las zeolitas es que, debido a la morfología y al tamaño de sus poros, son capaces de «reconocer» moléculas, es decir, de permitir o no el paso a través de sus poros de una determinada molécula en función del tamaño y forma que ésta posea. Esta selectividad de forma es una propiedad muy importante de estos compuestos, pues si estamos utilizándolos como catalizadores en una determinada reacción química, son capaces de controlar la entrada de reactivos o la salida de productos pudiendo llegar a diferenciar entre compuestos idénticos en composición (formados por los mismos átomos), pero que difieran en su forma y tamaño (por la disposición que adoptan esos átomos en el espacio). Imaginemos que en una industria se está llevando a cabo una reacción catalítica en la que a partir de un determinado reactivo se pueden formar tres productos distintos. En este caso es evidente que, una vez finalizado el proceso, sería necesario dedicar tiempo, medios y esfuerzo para separar el compuesto que tenga interés industrial de los otros dos. Pues bien, si esta reacción se llevase a cabo sustituyendo el catalizador anterior por una zeolita sería posible que de los tres productos formados únicamente uno de ellos, debido a su tamaño y forma, tuviese preferencia para difundir desde los poros hacia el exterior. El avance que representa el haber logrado inducir una selectividad de forma es evidente, pues en catálisis es importante no sólo lograr que el proceso de transformación de una sustancia en otra se acelere, sino también que éste sea lo más

selectivo posible, pues así se facilita el aislamiento y la purificación del producto final.

El pequeño tamaño de poro que presentan las zeolitas puede en ocasiones ser una desventaja, pues impide su utilización en reacciones donde las moléculas sean más grandes que dicho tamaño de poro. Como consecuencia, numerosas investigaciones actuales se dirigen a la síntesis de zeolitas con un diámetro de poro superior al de las zeolitas convencionales y que, por tanto, permitan el acceso a un mayor número de moléculas. Otro reto importante consiste en desarrollar zeolitas capaces de distinguir entre moléculas que sean imágenes especulares no superponibles (isómeros ópticos), es decir que teniendo igual composición, tamaño y forma, difieren en su orientación espacial. Es como si la zeolita pudiese diferenciar entre nuestras dos manos, que aun siendo iguales, no son superponibles sino imágenes especulares (así un guante de la mano derecha no podemos ponérselo en la izquierda). El material podría, por tanto, reconocer únicamente a una de ellas y hacer que fuese ésta la que reaccionase selectivamente. La importancia de este hecho en farmacología es indudable, pues en muchas ocasiones sólo uno de los isómeros ópticos es efectivo como fármaco, pudiendo ser el otro inactivo o incluso perjudicial. Un ejemplo de este tipo de zeolitas, sintetizada por investigadores pertenecientes a la Universidad de Estocolmo (Suecia) y al Instituto de Tecnología Química de Valencia (UPV-CSIC), es la representada en la Figura 4.9.

En definitiva, es evidente que a la hora de desarrollar nuevas zeolitas con funcionalidades específicas, es necesario controlar el tamaño, la forma, la uniformidad y la periodicidad de los poros. La incesante investigación en esta área está permitiendo no solo incrementar el tamaño de poro en las zeolitas sino sintetizar otros materiales, por ejemplo, los materiales mesoporosos ordenados, que se caracterizan por disponer de un sistema ordenado de mesoporos con una elevada superficie.

Si pensamos en la ingente cantidad de dinero que mueven ciertas empresas, como las petroleras, las farmacéuticas o las de automoción, está clara la importancia que en términos monetarios representa el desarrollo de materiales con una actividad mejorada respecto a los catalizadores convencionales. Así por ejemplo, si se lograra una mejora de un 1% o 2% en la producción de gasolina, las empresas que refinan petróleo aumentarían enormemente sus beneficios. Este hecho, por sí solo, bastaría para explicar el gran interés que despiertan los avances que se van produciendo en investigación relacionados con el campo de la catálisis.

El mundo de los nanocatalizadores no se reduce únicamente a los materiales nanoporosos, sino que se extiende también a otros nanomateriales, originando un campo muy relevante en la investigación actual: la nanocatálisis. Un ejemplo típico de un nanomaterial que presenta una enorme importancia en la catálisis de diversos procesos

son las nanopartículas metálicas, que serán descritas en el Capítulo 6.

De una manera general, las principales aplicaciones de los nanocatalizadores están relacionadas con la síntesis de productos químicos, como fármacos o cosméticos, el refinado del petróleo y la protección del medioambiente. En este último caso, destaca el desarrollo de nanocatalizadores que sean aplicables a la industria de la automoción y que permitan reducir las emisiones de sustancias altamente perjudiciales para el medioambiente, como el monóxido de carbono o los óxidos de nitrógeno, convirtiéndolos en productos inocuos. Las consideraciones medioambientales también hacen que en el diseño actual de procesos industriales se tienda a sustituir los catalizadores convencionales por otros que sean inofensivos para el medioambiente, tanto en su fabricación, como en su uso y posterior reciclado. Nos encontramos de nuevo ante la necesidad de dirigir nuestros esfuerzos al desarrollo de procesos que se encuentren en consonancia con una química verde, que permita un desarrollo sostenible.

4.6. Materiales biomiméticos o bioinspirados

A lo largo del presente capítulo se ha realizado un breve recorrido por una serie de materiales que están siendo sintetizados actualmente con el objetivo de dar respuesta a las diversas necesidades que van surgiendo en nuestra sociedad. Sin embargo, no está de más recordar que muchos de ellos no son el resultado de una auténtica invención, sino que para sintetizarlos se ha buscado inspiración en el mundo natural que nos rodea. Este tipo de materiales sintetizados por el hombre, pero basados en ideas obtenidas de la naturaleza, reciben el nombre de materiales biomiméticos o bioinspirados, y constituyen una interesante línea de investigación seguida por numerosos laboratorios de todo el mundo.

Así, por ejemplo, tomando como maestra a la naturaleza se han desarrollado materiales altamente hidrofóbicos, es decir, que repelen el agua. Para ello es posible inspirarse en las hojas de loto (Figura 4.10.A), pues se caracterizan por presentar esa misma propiedad. En una hoja de loto, el agua no se extiende sobre toda su superficie, sino que permanece formando gotitas esféricas que acaban resbalando hasta caer, arrastrando con ellas la suciedad. De esta manera, la hoja no solo no se moja sino que se «autolimpia» por efecto del agua. La importancia que tendría disponer de materiales que presentasen este mismo comportamiento frente a los líquidos es innegable. Podrían fabricarse, por ejemplo, camisetas que fuesen inmunes no sólo a la lluvia sino a las manchas de vino o parabrisas que permaneciesen secos y limpios independientemente de las condiciones meteorológicas. Sin embargo, para poder llegar a obtener materiales

que reproduzcan las propiedades de las hojas de loto, es necesario comenzar estudiando cuál es su composición y su estructura.

Al visualizar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) una de estas hojas se observa que está formada por micromontículos (Figura 4.10.B) y, si nos acercamos más, puede verse como éstos, a su vez, se encuentran recubiertos de nanopelos (Figura 4.10.C). La combinación de estas micro y nanoestructuras dota a la hoja de una rugosidad que, junto con la hidrofobicidad intrínseca aportada por la presencia de sustancias de tipo cera en su superficie, va a ser la responsable de minimizar su contacto con el agua. Entre los numerosos intentos que se están realizando para mimetizar la estructura de la hoja de loto comentaremos el desarrollado por K. Lau y colaboradores que han utilizado bosques de nanotubos de carbono como base para obtener materiales superhidrofóbicos.

En la Figura 4.10.D puede verse una imagen de SEM de una superficie recubierta con nanotubos de carbono alineados verticalmente donde se ha controlado tanto el diámetro como la longitud de los nanotubos de manera que se genere una superficie uniforme. Estos nanotubos son recubiertos con un polímero, el politetrafluoroetileno (PTFE), que se caracteriza por su impermeabilidad. La combinación de estos dos elementos, los nanotubos de carbono y el PTFE, permite mimetizar las micro(nano)estructuras y la composición cérica de la hoja originando superficies con una altísima hidrofobicidad, como demuestra la Figura 4.10.E, donde puede verse lo que ocurre al añadir una gota de agua sobre la superficie creada artificialmente. La gota adopta una forma esférica para intentar minimizar el contacto con la superficie hidrofóbica.

Otros materiales bioinspirados destacables son aquellos basados en ciertos biocomposites naturales fabricados por organismos vivos y que desempeñan una función protectora, como son los exoesqueletos de moluscos, insectos o crustáceos. La concha de un molusco presenta una estructura formada por láminas de aragonito (carbonato de calcio) que se encuentran cohesionadas gracias a la presencia de ciertas proteínas que hacen las veces de pegamento. El material híbrido orgánico-inorgánico resultante presenta interesantes propiedades, destacando su gran resistencia a la rotura. Si nos fijamos en cómo está constituido este material, podremos tomarlo como base para sintetizar artificialmente un material similar; lo que se logrará, al igual que ocurría en el caso de las hojas de loto, mimetizando la jerarquía existente entre los diferentes componentes de los materiales naturales.

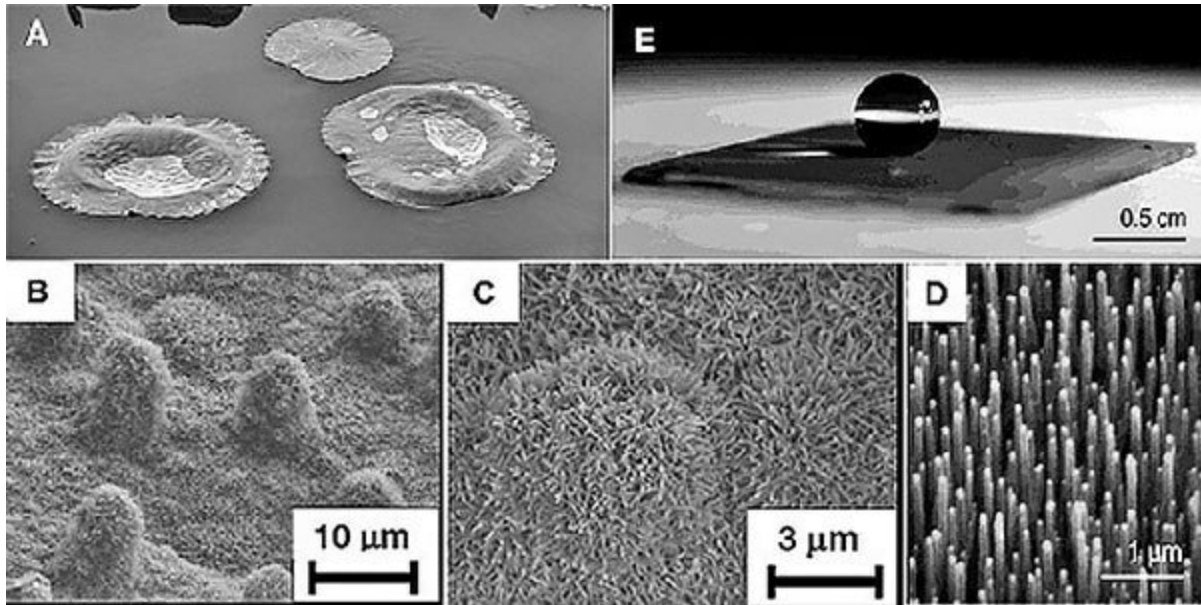


FIGURA 4.10. A). Fotografía de hojas de loto. B) y C) Imágenes de SEM de distinta resolución de una hoja de loto. Adaptado con permiso de *Nanotechnology* n.º 17, pp. 1359-1362, 2006. IOP Publishing. D) Imagen de SEM del material biomimético generado utilizando nanotubos de carbono alineados verticalmente funcionalizados con un polímero. E) Imagen que permite observar el comportamiento de la superficie biomimética frente al agua. Adaptado con permiso de *NanoLetters* n.º 3, n.º 1701-1705. Copyright 2003 Sociedad Americana de Química.

Otro ejemplo similar es el desarrollado por D. Ingber y J. G. Fernández, de la Universidad de Harvard (EE.UU.). Estos investigadores han desarrollado un material, denominado Shrilk, que mimetiza la cutícula de los insectos no solo en composición sino también en arquitectura; y que, por tanto, presenta unas propiedades similares a ésta. Es decir, además de ser biocompatible y biodegradable, presenta una gran resistencia, una gran dureza y una baja densidad. Todo ello lo hace idóneo como sustituto de determinados plásticos o para ser utilizado en aplicaciones médicas. Tanto su bajo precio como su propio nombre derivan de que los materiales de partida son polisacáridos de quitosano aislados de cáscaras de gambas (*shrimp shells*) y proteínas derivadas de la seda (*silk*).

Los ejemplos mencionados nos permiten hacernos una idea de lo útil que puede ser mirar a nuestro alrededor y estudiar la naturaleza. Este estudio resulta cada vez más asequible a nuestras posibilidades, pues hoy en día disponemos de multitud de modernas técnicas de análisis que nos permiten acceder a la estructura más íntima de los materiales. Así, aprendiendo de lo que en la naturaleza se ha ido perfeccionando a lo largo de millones de años de evolución, podremos conseguir fabricar materiales que cada vez serán más sofisticados y sobre los que, desde nuestro mundo macroscópico, podremos tener un control a nivel nanométrico que a su vez nos permita influir en las propiedades resultantes del material.

4.7. Los nanomateriales y la vida diaria: los beneficios y riesgos de lo «nano»

A la vista de lo expuesto hasta el momento, es innegable la gran diversidad de potenciales aplicaciones que es posible desarrollar utilizando como base nanomateriales, tales como el grafeno, los fullerenos, los nanotubos de carbono, los nanocomposites o las nanopartículas metálicas. Sin embargo, a su vez, es evidente que existe una considerable distancia entre los avances realizados en un laboratorio de investigación y su aplicación industrial, llegando a transcurrir a veces largos periodos de tiempo entre uno y otro. No obstante, como se mostrará posteriormente, ya existe una gran cantidad de productos que incorporan algún nanomaterial en su diseño. Estos nanoproductos abarcan desde el deporte hasta la alimentación, pasando por la industria textil y la cosmética. Por tanto, no cabe ninguna duda de que la nanotecnología ya está presente en nuestras vidas.

En paralelo a esa progresiva implantación de la nanotecnología en los productos de consumo, se están alzando algunas voces de alarma que advierten sobre los riesgos que puede conllevar su fabricación y su uso. De hecho, es evidente que los importantes avances que se están produciendo actualmente deben ir acompañados por estudios que evalúen el riesgo potencial en la salud y en el medioambiente que entraña el uso de esta nueva tecnología, basada en el control y la manipulación de la materia en la escala nanométrica. Por tanto, resulta imprescindible desarrollar y aplicar una normativa legal rigurosa, pero que a la vez evite un alarmismo infundado cuando la inocuidad de un producto se haya probado. A este último punto también ha de contribuir una formación adecuada de los consumidores en los temas relacionados con la nanotecnología, como ya se está impulsando desde Europa y Estados Unidos. Estos aspectos normativos y educativos serán comentados en detalle en el Capítulo 8, donde reflexionaremos sobre los diferentes aspectos que inciden en la percepción social de la nanociencia y la nanotecnología.

— 5 —

**NANOTECNOLOGÍAS PARA LA SOCIEDAD DE LA
INFORMACIÓN**

La última pregunta se formuló por primera vez, medio en broma, el 21 de mayo de 2061, en momentos en que la humanidad (también por primera vez) se bañó en luz. La pregunta llegó como resultado de una apuesta por cinco dólares hecha entre dos hombres que bebían cerveza, y sucedió de esta manera:

Alexander Adell y Bertram Lupov eran dos de los fieles asistentes de Multivac. Dentro de las dimensiones de lo humano sabían qué era lo que pasaba detrás del rostro frío, parpadeante e intermitentemente luminoso —kilómetros y kilómetros de rostro— de la gigantesca computadora. Al menos tenían una vaga noción del plan general de circuitos y retransmisores que desde hacía mucho tiempo habían superado toda posibilidad de ser dominados por una sola persona.

Multivac se autoajustaba y autocorregía. Así tenía que ser, porque nada que fuera humano podía ajustarla y corregirla con la rapidez suficiente o siquiera con la eficacia suficiente. De manera que Adell y Lupov atendían al monstruoso gigante sólo en forma ligera y superficial, pero lo hacían tan bien como podría hacerlo cualquier otro hombre. La alimentaban con información, adaptaban las preguntas a sus necesidades y traducían las respuestas que aparecían. Por cierto, ellos, y todos los demás asistentes tenían pleno derecho a compartir la gloria de Multivac.

ISAAC ASIMOV, «La última pregunta», (1956), en *La última pregunta y otros cuentos*, Ediciones B, 1994.

5.1. Siglo XXI: la llegada del «homo digitalis»

No hace falta más que un pequeño recorrido en el metro de cualquier gran ciudad, o sentarse unos momentos en una cafetería, para comprobar que estamos rodeados de personas que continuamente utilizan el teléfono móvil o un pequeño ordenador para escuchar música, ver una película, editar algún texto, entretenerse con algún juego, comunicarse mediante rápidos mensajes, hacer fotografías, escribir sus impresiones sobre sucesos que acaban de ocurrir y que hacen llegar instantáneamente a sus amistades a través de las redes sociales, comprar las entradas de un espectáculo o consultar la última actualización de un periódico. Otras personas leen sus novelas favoritas en un «libro electrónico», escuchan los éxitos del momento con un reproductor de música o se entretienen de manera hipnótica jugando con una consola portátil. En nuestras empresas el computador personal (PC) o los potentes servidores se han convertido en herramientas fundamentales que permiten el diseño, producción y

comercialización de bienes de consumo, y facilitan la comunicación interna, la redacción de informes, el contacto inmediato con clientes, la gestión de enormes bases de datos, la contabilidad de miles de facturas, el almacenamiento de impensables cantidades de documentos o la gestión de complejos proyectos. En nuestros hogares, en nuestros colegios, en los supermercados: allá donde miremos nos encontraremos seguramente con equipos electrónicos (*hardware*) y con códigos y programas (*software*) cada vez más versátiles.

En menos de medio siglo los seres humanos se han dotado de nuevas herramientas que facilitan las relaciones de todo tipo, profundizando en una de las características de esta especie: su necesidad de socializarse y comunicarse, y la capacidad para adaptarse a los cambios. El desarrollo de todas estas nuevas tecnologías de la información y de las comunicaciones (generalmente conocidas como TIC, por sus siglas) está aumentando a un ritmo frenético las posibilidades que se abren ante nuestros ojos. La mayor parte de los países se han aprovechado de este nuevo entorno tecnológico, siguiendo las tendencias marcadas por los más avanzados, y casi sin darnos cuenta nuestra civilización se ha hecho absolutamente dependiente de las TIC. Al igual que el control del fuego supuso un antes y un después para la historia de la humanidad, ya que dotó de seguridad y habitabilidad a los refugios, permitió la cocción de alimentos y la forja de diversos metales, se puede decir que la revolución experimentada en las TIC desde finales del siglo XX está suponiendo un salto de igual magnitud que tendrá consecuencias de difícil predicción. Ahora mismo estamos cabalgando sobre una ola sin que sepamos claramente hasta qué playa nos va a llevar. Algunas de esas consecuencias ya se han manifestado. Un ejemplo claro ha sido la globalización de la economía, que ha podido llevarse a cabo gracias a la existencia de potentes equipos informáticos y redes de comunicaciones que permiten la gestión de grandes volúmenes de información, realizar movimientos instantáneos de capital y acceder a proveedores de bienes y servicios ubicados en cualquier lugar del planeta. Muchas de las turbulencias económicas que están padeciendo países o regiones que fueron hegemónicas durante el siglo XX, como la vieja Europa o los Estados Unidos de Norteamérica, se deben en parte a las nuevas reglas del juego impuestas por la globalización, junto con la liberalización del comercio o la deslocalización de los centros productivos. Las mismas redes que favorecen nuevos modelos de negocio sirven para poner en marcha nuevos esquemas de interacción entre las personas como el representado por las redes sociales (que a su vez no dejan de ser otro tipo de negocio). Estas redes sociales están en su infancia y es muy difícil saber cómo evolucionarán y qué efectos provocarán en las sociedades dentro de un par de décadas o medio siglo, pero parece que pudieran llegar a ser un mecanismo para profundizar en

la democratización de las mismas, siendo el contrapeso de una globalización basada en meros intereses económicos. Por otro lado, recientes acontecimientos muestran cómo las redes informáticas son un medio para conocer lo que las entidades hacen o las personas piensan, gracias a sofisticados sistemas de espionaje. Como siempre, nos encontramos ante la cara y la cruz de la ciencia y la tecnología.

Las TIC han servido para que todas las áreas convencionales de producción hayan experimentado una profunda revolución y para la implantación de nuevos servicios y nuevos modelos de negocio. Sin embargo debemos recordar que las TIC se basan en una tecnología capaz de generar, almacenar, procesar, transmitir y codificar todo tipo de datos, y que dichas acciones al fin y al cabo se realizan mediante el adecuado control de corrientes eléctricas, campos magnéticos o la propagación de ondas electromagnéticas, gracias a un profundo conocimiento de estos fenómenos físicos y de los materiales que están involucrados en dichos procesos. Cuando descargamos un archivo con un videoclip desde un remoto servidor recibimos grandes cantidades de datos a través de nuestra conexión inalámbrica, de cobre o de fibra óptica; dichos datos son almacenados en un disco duro fabricado con sofisticados materiales magnéticos o en una memoria de estado sólido, para posteriormente ser manipulados a gran velocidad mediante complejas operaciones algebraicas o lógicas gracias a los cientos de millones de transistores de un procesador. Finalmente los datos resultantes se muestran convertidos en imágenes sobre una pantalla ultradelgada formada por millones de diminutos píxeles. Este acto cotidiano era inimaginable hace varias décadas cuando procesadores, discos duros, fibras ópticas o pantallas planas sencillamente no existían salvo en la imaginación de algunos futurólogos.

Evidentemente si hablamos de materiales, corrientes eléctricas y campos magnéticos, la nanotecnología tiene mucho que decir al respecto, pues nos va a permitir controlar el flujo de datos y su procesamiento al nivel de la nanoescala. En realidad, el desarrollo actual de las TIC ha sido posible gracias a la microtecnología, primero, y la nanotecnología, más tarde, que han impulsado el proceso de miniaturización de componentes y dispositivos que encontramos en los equipos electrónicos. Las secciones siguientes narran esta historia, comenzada hace más de un siglo, plagada de descubrimientos y cambios de paradigmas, historia que continúa desarrollándose y de la que somos testigos y también protagonistas.

5.2. El nacimiento de la electrónica: del vacío a los semiconductores

A finales del siglo XIX ya se conocía que los átomos eran los constituyentes fundamentales de la materia, tal como la percibimos en nuestro entorno. A su vez, existían claros indicios que señalaban que los átomos estaban constituidos por otras partículas que, entre otras propiedades, eran las responsables de los fenómenos eléctricos observados en la naturaleza. A finales de la década de 1890, el físico J. J. Thomson descubrió los llamados «rayos catódicos» en una serie de experimentos sobre el transporte de la electricidad a través de gases de diverso tipo encerrados en ampollas de vidrio. Thomson determinó que dichos rayos estaban constituidos por partículas muy ligeras y que presentaban carga eléctrica negativa. Ahora sabemos que estas partículas, que se denominaron «electrones», son responsables de la mayoría de los fenómenos eléctricos y de la formación de los enlaces químicos que dan lugar a las diversas formas adoptadas por la materia, tal como hemos descrito en anteriores capítulos. El electrón era una pieza más que nos permitía entender el maravilloso puzle de la naturaleza. Este fantástico descubrimiento se apoyó en todo el conocimiento acumulado durante varios siglos sobre los fenómenos electromagnéticos, que quedaron unificados en el gran marco conceptual desarrollado por el físico escocés J. C. Maxwell. La importancia de los trabajos de Thomson fue reconocida mediante la concesión del Premio Nobel de Física en 1906.

La pequeña masa de los electrones resultó ser decisiva para sus aplicaciones tecnológicas, pues gracias a su ligereza pueden responder con facilidad a la presencia de campos eléctricos y magnéticos. De esta manera es posible provocar en los electrones movimientos rápidos de una forma controlada que es lo que conocemos como corriente eléctrica. La electricidad, que es como se denomina vulgarmente a la corriente eléctrica, se comenzó a usar a finales del siglo XIX tanto para transmitir información utilizando el telégrafo o el teléfono como para distribuir energía en las ciudades. Por si esto fuese poco, los electrones a su paso por un gas o un filamento del material adecuado (carbono, metales) provocaban su incandescencia que podía ser aprovechada para la iluminación, tal como vislumbraron H. Davy, J. Swan y T. A. Edison. Desde ese momento la vida en nuestros hogares cambió para siempre. Además, la facilidad con la que los electrones pueden ser acelerados permite su utilización como emisores y receptores de ondas electromagnéticas que, convenientemente moduladas, sirven para codificar y enviar información a sitios remotos mediante el sistema que llamamos «radio». De este modo, utilizando estos conceptos, entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX se desarrollaron un conjunto de técnicas con las que se podía controlar el movimiento de los electrones con el fin de transportar y almacenar energía, iluminar vías y viviendas, y transmitir información de manera casi instantánea entre puntos alejados. Había nacido la electrónica, el arte de dominar las corrientes de

electrones. Además del papel relevante de la electricidad en la transmisión de información y la iluminación, no se debe olvidar su papel en el funcionamiento de decenas de artilugios mecánicos, mediante motores eléctricos, facilitando así muchas tareas en fábricas y hogares.

Durante sus inicios, la electrónica se desarrolló usando tanto metales como sistemas donde se había practicado el vacío para el transporte y control de los electrones. En 1906, el norteamericano L. De Forest se inspiró en el tubo de rayos catódicos para diseñar la primera válvula o tríodo de vacío (Figura 5.1). Este dispositivo posee tres terminales, de ahí su nombre, y permite controlar el flujo de electrones entre dos de estos terminales mediante el voltaje que se aplica en el tercer terminal. En realidad se trataba de un «grifo electrónico». El tríodo fue extensamente utilizado durante la primera mitad del siglo XX en la fabricación de emisores y receptores de radio, osciloscopios, radares, televisores e impresionantes máquinas para realizar cálculos. Toda la electrónica basada en tríodos y tubos de rayos catódicos se denomina «electrónica de vacío», ya que en estos dispositivos los electrones se desplazan dentro de un tubo sellado en el que se ha practicado el vacío, evitando las colisiones de los electrones con las moléculas del gas residual o que la ionización de éstas provoque descargas incontroladas.

Las primeras máquinas de calcular o computadoras totalmente electrónicas se basaron en el uso intensivo de estos tríodos. Estos «dinosaurios» de la computación se idearon con fines militares durante la Segunda Guerra Mundial para realizar complejos cálculos de las trayectorias de proyectiles o para el descifrado de los códigos empleados por los alemanes en sus máquinas ENIGMA. Las máquinas de la serie Colossus Mark II desarrolladas en Reino Unido en 1944 poseían 2400 tríodos. En EE.UU. se desarrolló la computadora ENIAC (siglas de la denominación inglesa *Electronic Numerical Integrator and Calculator*) que utilizaba más de 17 000 tríodos, pesaba casi treinta toneladas, consumía unos 150 kW y permitía realizar 300 multiplicaciones o 5000 sumas en un segundo, una altísima velocidad de procesamiento para la época. Un auténtico «dinosaurio» de la computación. Los computadores comerciales basados en tríodos aparecieron a finales de la década de los cuarenta y continuaron usándose hasta bien entrados los años sesenta, a pesar de ser bastante voluminosos y devorar mucha energía. Durante otros cuarenta años la electrónica de vacío mantuvo su vigencia en el mercado de los monitores y receptores de televisión, pero en la última década hemos asistido a su progresiva extinción de nuestras casas y oficinas. Ahora la electrónica de vacío tiene una cuota de mercado residual, empleándose en sofisticados amplificadores analógicos usados en grabación o reproducción musical, y en interruptores, relés y condensadores de equipos de alta

tensión.

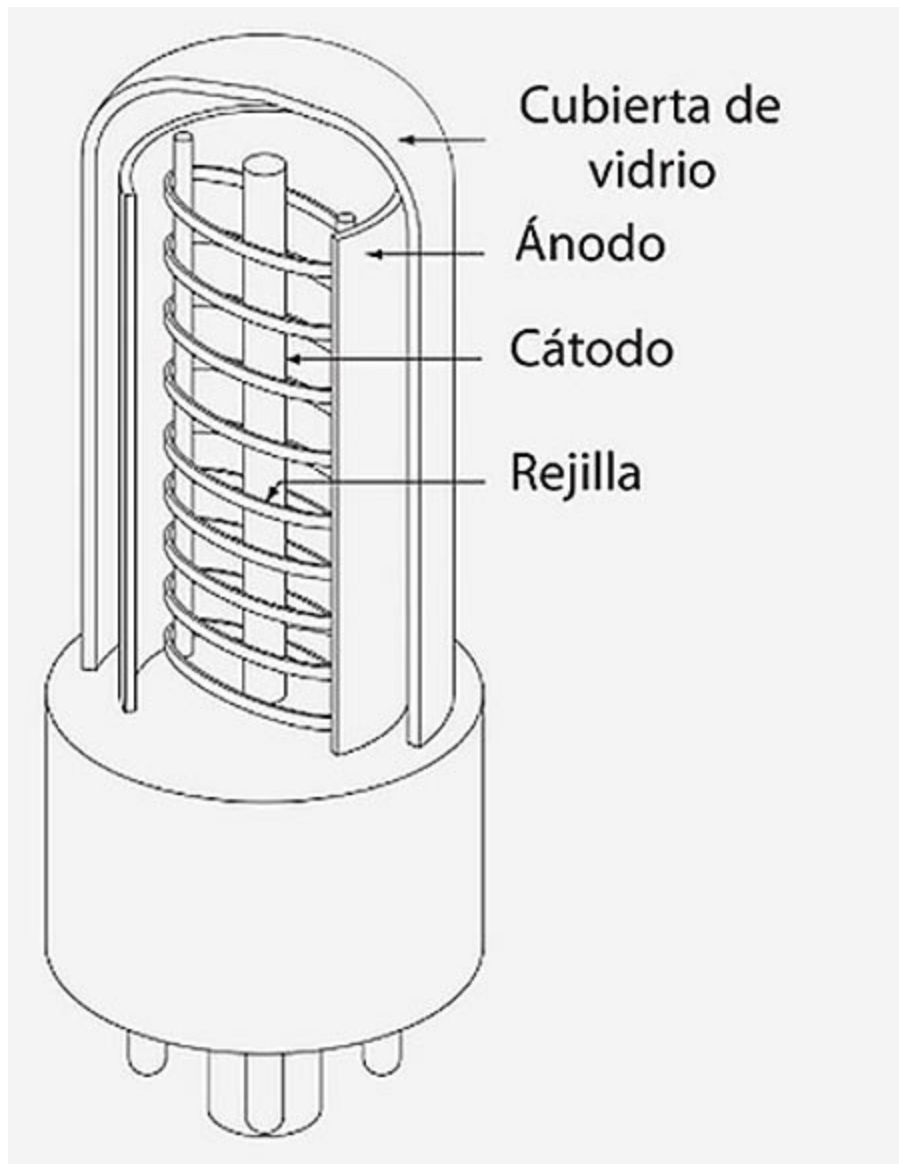


FIGURA 5.1. Partes de un triodo de vacío. Adaptado de wikipedia <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Triode_tube_schematic.svg>.

La electrónica de vacío presentaba serias limitaciones para poder incrementar la potencia de cálculo, ya que la mejora de sus prestaciones pasaba por acumular más y más triodos, aumentando el tamaño de los equipos y derrochando más y más energía. Por si fuese poco los triodos se estropeaban con bastante frecuencia, lo que limitaba el uso de los computadores de triodos para realizar cálculos de larga duración. El paradigma de la electrónica sufrió una transformación en la segunda mitad del siglo XX a raíz del descubrimiento realizado en 1947 por parte de J. Bardeen, W. Brattain y W. Shockley en los Laboratorios Bell de EE.UU., quienes inventaron y patentaron el primer transistor de germanio, un material semiconductor. Los materiales semiconductores se

comportan como aislantes eléctricos a bajas temperaturas y como metales conductores a altas temperaturas. Posteriormente desarrollaron distintos tipos de transistores usando otros materiales semiconductores como el silicio. En la Figura 5.2 se muestran diversos transistores en los que se aprecia que poseen tres terminales al igual que su hermano mayor, el triodo. En los transistores los electrones viajan por un material sólido en lugar de un tubo vacío, realizando las mismas tareas que los triodos de vacío pero requiriendo la aplicación de voltajes muy inferiores, lo que suponía un consumo energético mucho menor. Había nacido la electrónica de «estado sólido» en contraposición a la electrónica de vacío. Por la trascendencia de este hallazgo los tres descubridores del transistor recibieron en 1954 el Premio Nobel de Física.

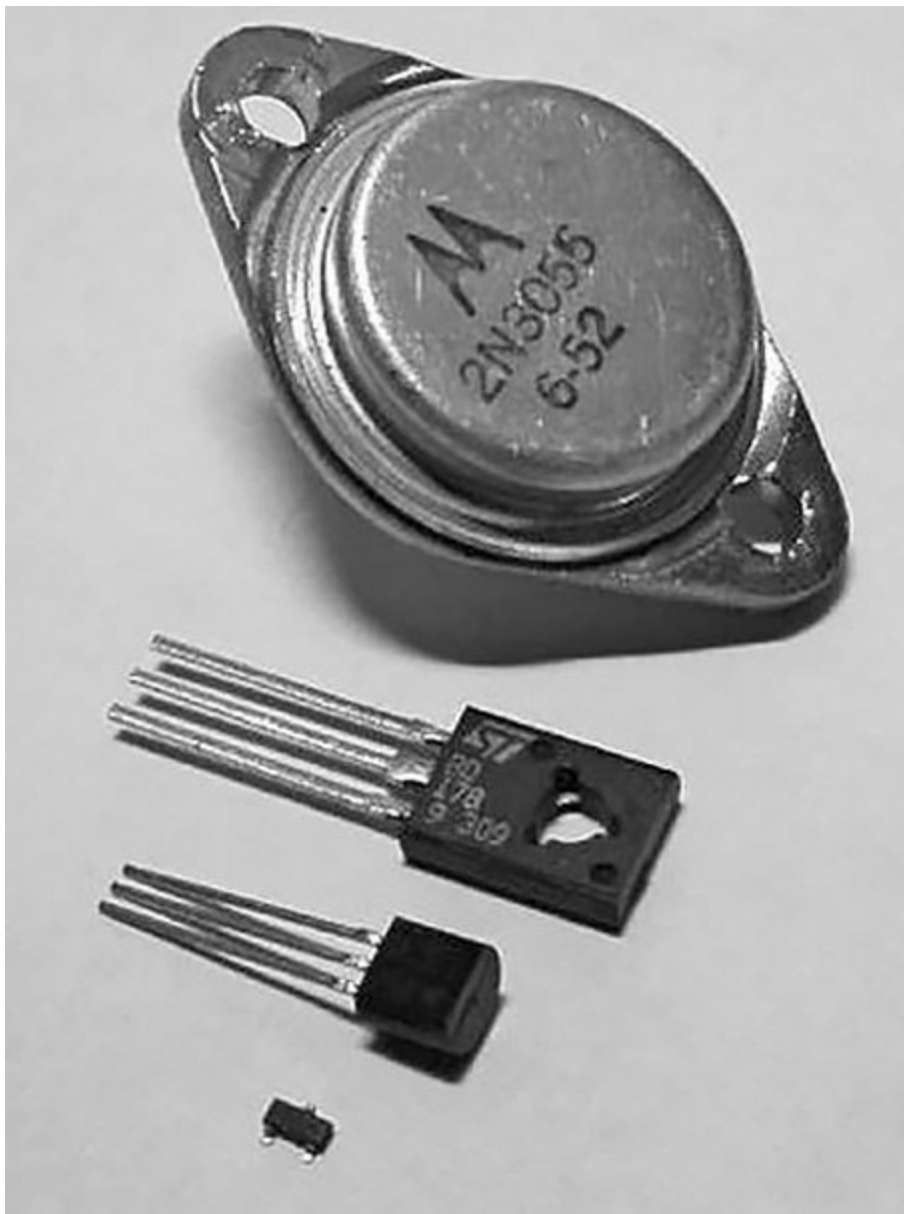


FIGURA 5.2. Diversos modelos de transistores. Imagen obtenida de wikipedia. <[http:// commons.wikimedia.org/wiki/ File:Transistorer_%28cropped%29.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistorer_%28cropped%29.jpg)>.

Sin embargo, ni los investigadores ni los directivos de los Laboratorios Bell supieron vislumbrar el enorme potencial de aplicación de este descubrimiento y a principios de los años cincuenta concedieron la licencia de explotación de su patente a la empresa japonesa Tokyo Tsushin Kogyo KK, que se basó en este nuevo invento para construir un receptor de radio de bajo coste. Los transistores, condensadores y resistencias se agrupaban sobre una placa y eran conectados a través de pistas de cobre trazadas sobre la parte trasera de la misma placa: había nacido el «circuito impreso». Dicho receptor de radio, dirigido a las clases populares, tuvo una gran acogida y la empresa decidió expandirse, para lo que decidió modificar su nombre usando una identificación más comercial, SONY, derivado de la palabra «sonnus» (sonido en latín). Esta compañía se ha convertido en uno de los gigantes de la industria de la información con el paso del tiempo. Éste es un magnífico ejemplo de cómo la transferencia de tecnología depende de muchos factores que deben actuar de manera complementaria: no se trata sólo de hacer buena ciencia o tener buenas ideas que puedan plasmarse en una posible aplicación, sino que además hay que saberlas proteger mediante patentes y disponer de adecuadas estrategias de transferencia y comercialización de estos conocimientos.

5.3. La increíble historia del transistor menguante

La llegada del transistor supuso una revolución más profunda de lo que se podía prever ya que permitió explorar una estrategia: la miniaturización de los dispositivos electrónicos. Para aumentar la capacidad de procesamiento de la información necesitamos incorporar más elementos (resistencias, condensadores, transistores) en un circuito y la electrónica de estado sólido permite disminuir cada vez más el tamaño de estos elementos, compactando más el sistema, lo que acorta el recorrido de los electrones en su interior haciendo que se pueda procesar más información de manera más rápida. «Más pequeño» significa, en este caso, mayor rapidez y mayor capacidad. Una auténtica panacea: se puede aumentar la capacidad de procesamiento sin aumentar el tamaño del conjunto del equipo. Estas ideas permitieron diseñar nuevos circuitos impresos. Sin embargo, la complejidad de este tipo de circuitos impresos hizo que se buscara una alternativa. En 1958, J. Kilby, de la empresa Texas Instruments, y en 1959, R. Noyce, de la empresa Fairchild Camera and Instruments, demostraron que la solución era integrar todos los elementos que dan funcionalidad a un dispositivo sobre una oblea de silicio, usando sofisticadas técnicas de estampado sobre superficies, a las que se llamaron técnicas litográficas por su similitud con los procesos de impresión.

Estos nuevos métodos involucran el uso de luz, máscaras, métodos de ataque químico y sustancias que actúan como reveladores. Con este conjunto de técnicas se perfilan sobre la superficie del silicio motivos que delimitan regiones ricas en electrones (regiones n), regiones pobres en electrones (regiones p), regiones aislantes de óxido de silicio (que constituyen barreras para el paso de las cargas) y otras regiones sobre las que se depositan metales que permiten hacer buenos contactos o proporcionan otras propiedades adicionales al transistor o condensador. El resultado es una arquitectura compleja que se conoce como circuito integrado o «chip». A partir de esos momentos, el silicio fue el material sobre el que se asentó la poderosa industria de la electrónica. La elección del silicio no fue baladí: posee unas propiedades electrónicas aceptables a la vez que es relativamente barato por ser muy abundante en la corteza terrestre. Por este revolucionario planteamiento J. Kilby recibió el Premio Nobel de Física en el año 2000.

Es interesante mencionar que el nacimiento de los primeros circuitos integrados formados con elementos de tamaño milimétrico se producía aproximadamente en el mismo momento en el que R. Feynman realizaba sus asombrosas predicciones de lo que posteriormente sería la nanotecnología. Desde principios de los años sesenta se inició una vertiginosa carrera por empaquetar el mayor número de componentes electrónicos en los chips, con la finalidad de proporcionar más prestaciones al sistema final (receptores de radio o TV, calculadoras, computadores, tarjetas para controlar procesos, sistemas sensores, etc.). Para poder reducir más y más el tamaño de los transistores, condensadores y resistencias, se han ido desarrollando técnicas muy sofisticadas como la litografía óptica que trabaja con radiación ultravioleta (UV), el crecimiento epitaxial mediante haces moleculares (MBE) o la litografía electrónica de las que ya hemos hablado en el Capítulo 3. El número de transistores que es posible incorporar por unidad de superficie se ha duplicado aproximadamente cada año y medio, tal como fue pronosticado en 1965 por G. Moore, cofundador de la empresa Intel, en la ley empírica que lleva su nombre y que se ilustra en la Figura 5.3.

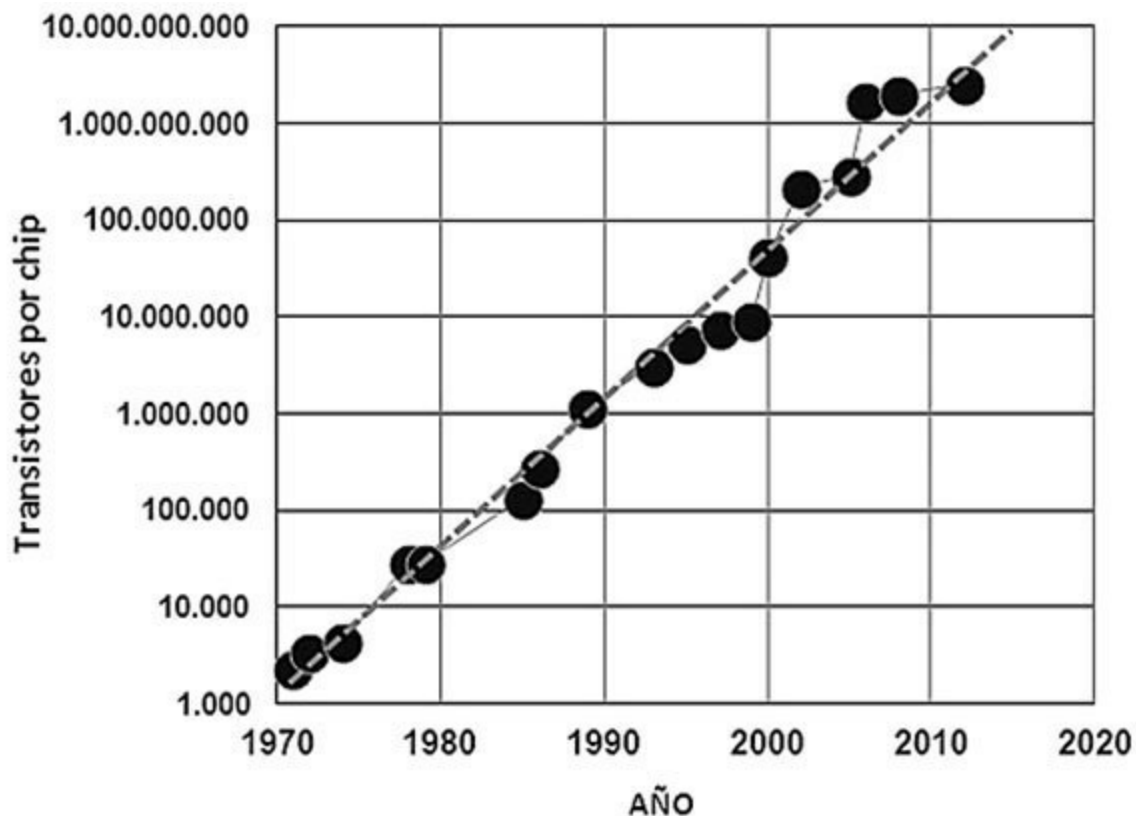


FIGURA 5.3. Evolución del número de transistores por procesador. El comportamiento exponencial observado, enfatizado mediante la línea discontinua, se conoce como la Ley de Moore.

Los transistores que se comercializan en la actualidad están fabricados principalmente con la llamada tecnología MOSFET (siglas del término inglés *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). Un transistor MOSFET posee una región llamada «canal» por la que transita la carga eléctrica desde un electrodo denominado «fuente» a otro denominado «drenaje». La longitud de dicho canal indica la generación tecnológica a la que el transistor pertenece. La Figura 5.4 muestra el esquema de uno de estos transistores. En el año 2004, Intel fabricó los primeros procesadores con transistores con 90 nm de longitud de canal. Si consideramos por bueno el argumento de que la nanotecnología tiene sus dominios por debajo de los 100 nm, ya en la nanoescala, se puede decir que la «nanoelectrónica» basada en el silicio ya lleva casi una década con nosotros. Todos los dispositivos que nos facilitan nuestra vida cotidiana y aumentan nuestra capacidad de interacción ya son «hijos de la nanotecnología». Lo más llamativo es que el ritmo de miniaturización ha podido mantenerse durante medio siglo a pesar de los múltiples problemas de índole tecnológica, nada fáciles de resolver, que han surgido en el camino. Por poner un ejemplo de lo sucedido en los últimos años podemos mencionar que en 2007 se implantó la tecnología de 45 nm, en 2009 aparecieron los transistores de la generación de los 32 nm, que es la que ahora usamos de forma mayoritaria hasta que el mercado se

inunde de procesadores basados en transistores de 22 nm, que comenzaron a fabricarse por Intel a finales del año 2011. Para hacernos una idea de lo que esta tecnología representa, solo basta mencionar que con ella se pueden empaquetar unos 10 millones de transistores en el espacio que ocupa el punto con el que esta frase termina. Nos encontramos, sin duda alguna, ante una de las obras cumbre del ingenio humano.

Cada avance en la miniaturización ha supuesto la superación de muchos retos tecnológicos mediante la adecuada elección y combinación de materiales, modificaciones en el diseño de la arquitectura del chip y avances en las herramientas de fabricación. Un ejemplo de estos avances lo encontramos en la espectacular mejora en las técnicas de litografía. Por ejemplo se puede utilizar luz de 193 nm para dibujar patrones de 30 nm gracias a las ideas del matemático e ingeniero T. Kailath, que recibió el Premio Fronteras del Conocimiento 2010 de la Fundación BBVA. Se sabe que el límite de la litografía óptica está impuesto por el principio de Rayleigh que, de forma resumida, afirma que no se pueden distinguir dos objetos, por ejemplo dos líneas, separadas menos que la mitad de la longitud de onda de la luz con la que los queremos observar. De esta manera usando una luz láser de 193 nm en los procesos litográficos sólo podríamos dibujar motivos separados unos 100 nm. Una opción para escribir motivos de tamaño nanométrico consiste en usar tecnología llamada «ultravioleta extremo» (EUV) pero resulta muy cara. La solución que propuso Kailath se basa en el uso de la teoría del procesamiento de señales que demuestran que uno puede ir más allá del límite impuesto por el principio de Rayleigh. Si se quiere distinguir dos líneas separadas menos de la mitad de la longitud de onda, esto se puede lograr desfasando de manera adecuada la luz que es emitida por una de las dos líneas. Esta idea, extendida a patrones y diseños mucho más complejos, es la que está detrás de las nuevas técnicas litográficas que permiten dibujar motivos de unas pocas decenas de nanómetros sobre una superficie.

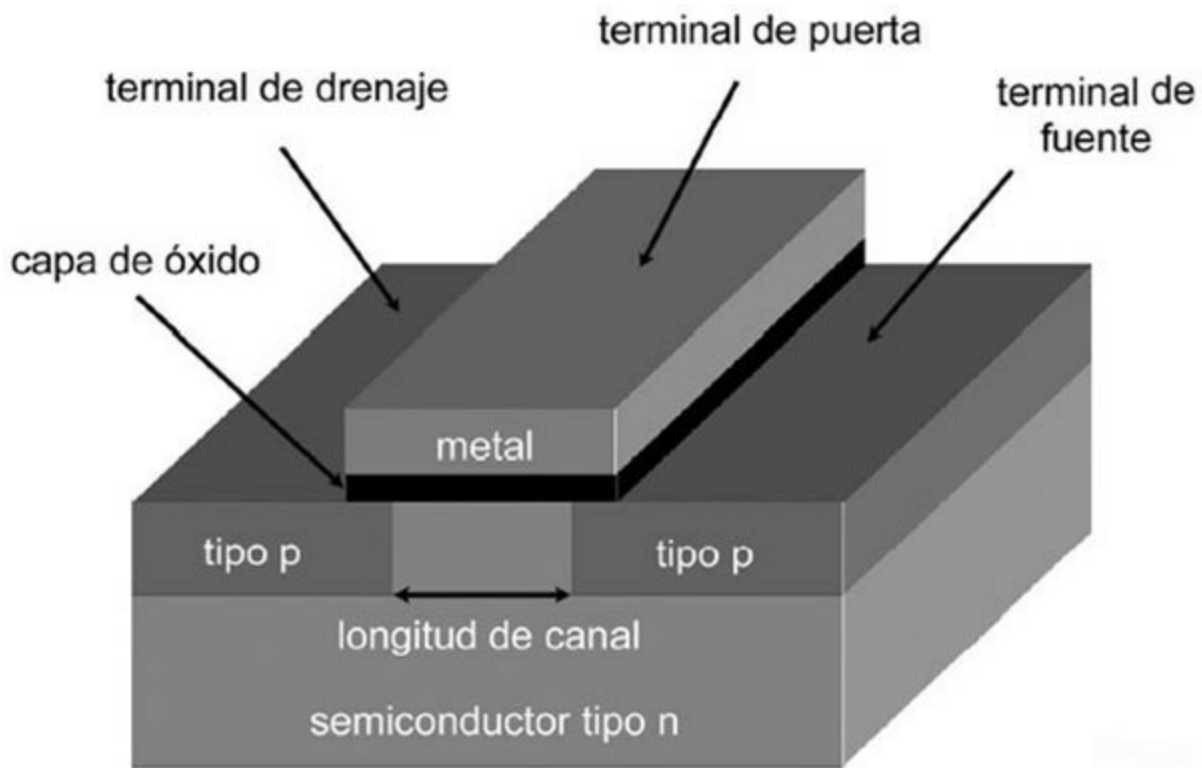


FIGURA 5.4. Esquema de un transistor MOSFET. La longitud del canal que conecta el terminal fuente con el terminal drenaje da nombre a la tecnología de fabricación: 90 nm, 45 nm, 32 nm, 22 nm, etc.

Otro ejemplo de los cambios en el diseño lo encontramos en la nueva generación de transistores de 22 nm que poseen una arquitectura tridimensional (3D), abandonando la típica configuración plana o 2D. Esta nueva arquitectura permitirá reducir el consumo energético de los dispositivos, uno de los temas clave para la industria de la electrónica, pero ha aumentado considerablemente la dificultad del diseño y fabricación de los procesadores. Sin embargo, a pesar de las dificultades iniciales, la implementación de las tecnologías de fabricación 3D abre una nueva senda en las estrategias de fabricación que conducirá al aumento de las capacidades y prestaciones de nuestros equipos electrónicos.

Para hacernos una idea acerca de la potencia de los procesadores que ahora se comercializan tomemos como ejemplo el procesador Intel Xeon E5 2687W que se basa aún en la «vieja» tecnología de 32 nm. Este procesador ocupa menos de 440 mm², tiene 8 núcleos con un total de 2270 millones de transistores que pueden funcionar a una frecuencia máxima de 3,8 GHz, con un consumo de 150 W. Estos números le permiten alcanzar una velocidad teórica máxima de casi 400 GFlop/s. Por cierto, un «Flop/s» es una unidad de medida del rendimiento de un computador que se refiere a una operación de «coma flotante» por segundo, entendiendo una operación de coma flotante como aquella que involucra números con una cierta cantidad de decimales. Si comparamos este procesador con el computador ENIAC, un auténtico dinosaurio que operaba a

500 Flop/s, vemos que el tamaño se ha reducido varios millones de veces a la vez que la potencia de cálculo se ha incrementado un factor de casi mil millones. Todo ello con mil veces menos de consumo energético. Sin embargo, los números que resultan más llamativos tienen que ver con el coste de un transistor. Por ejemplo, a finales de los años sesenta un transistor tenía un coste aproximado de un dólar. Por ese mismo dólar, en los años ochenta se obtenían mil transistores de un circuito integrado, en el año 2000, casi un millón de transistores, y hoy en día se consiguen unos cien millones de transistores. En realidad, el «milagro» de la electrónica se ha basado en la reducción espectacular de los costes de los componentes que ha permitido que el precio de un equipo informático se mantenga más o menos constante a lo largo del tiempo, siguiendo una ley empírica propuesta por B. Machrone en 1984. Todos estas cifras ayudan a entender la impresionante revolución que está ocurriendo en nuestra economía y nuestra sociedad: los sistemas electrónicos que nos ayudan en nuestra actividad cotidiana nos ofrecen cada vez más prestaciones, pagando menos por ello.

5.4. Más pequeño, más datos

Hasta ahora hemos descrito la evolución de la microelectrónica basada en el silicio y su conversión en la nanoelectrónica, pero estos cambios también han sido evidentes en otros dispositivos como memorias, discos duros, pantallas, cámaras, etc. El ritmo al que la capacidad de almacenamiento de datos ha crecido es impresionante. A mediados de los años ochenta los primeros computadores personales (PC) incluían un disco duro de 20 a 40 MB (megabytes) y por aquel entonces se utilizaban disquetes flexibles de 128 kB (kilobytes). Recordemos que un *byte* es una unidad de información que equivale, por lo general, a 8 bits, y que un bit es la unidad mínima de información que puede tomar los valores 0 o 1 en un sistema binario. En términos actuales, ¡un disco duro de aquel momento podría almacenar entre seis y doce canciones en formato *mp3*! Hoy en día, un PC de sobremesa incluye un disco duro de más de 2 TB (terabytes). Un cálculo simple revela que los discos duros han aumentado su capacidad de almacenamiento en un factor 100 000 en veinticinco años, en tan sólo una generación de nuestra especie.

La capacidad de almacenamiento de los discos duros ha crecido espectacularmente gracias a la aplicación de tecnologías basadas en sorprendentes fenómenos físicos. Un claro ejemplo es el uso de cabezas lectoras de bits magnéticos, basadas en el fenómeno de la magnetorresistencia gigante (GMR), descubierto en 1988 por A. Fert y P. Grünberg. En el año 1997, los primeros discos duros con este tipo de cabeza lectora

salieron al mercado, diez años después los dos investigadores recibieron el Premio Nobel de Física. Éste es un claro ejemplo de una transferencia rápida de un conocimiento básico al mercado y de la generación de pingües beneficios.

Además de los sistemas de almacenamiento de datos basados en materiales magnéticos, en los últimos quince años han emergido con fuerza los dispositivos de almacenamiento de estado sólido. Un ejemplo muy extendido en nuestra vida cotidiana lo encontramos en los dispositivos de tipo *pendrive* que utilizamos para almacenar y transferir datos. Algunos de estos dispositivos tienen una superficie de unos 2 cm^2 y llegan a almacenar 128 GB. Un simple cálculo nos muestra que en estos dispositivos un bit tiene una superficie similar a la que ocuparía un cuadrado de 40 nm de lado. Por lo tanto es evidente que la nanotecnología está impulsando el desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de datos que tienen aún un largo recorrido por delante. Pensemos, por ejemplo, que el desarrollo de bits que tuviesen un tamaño de 4 nm de lado permitiría la fabricación de dispositivos de más de 6 TB, capaces de almacenar más de 2000 horas de películas o ¡más de diez años consecutivos de música!

El espectacular crecimiento que se está observando en la densidad de almacenamiento de datos sigue la denominada Ley de Kryder, en honor a M. Kryder un ingeniero norteamericano que en un artículo publicado en 2005 en la revista *Scientific American* propuso una ley de crecimiento más rápida que la Ley de Moore para describir el crecimiento del almacenamiento en los discos duros. Esta ley dice que en los próximos treinta años veremos cómo se multiplica por cinco la capacidad de almacenamiento cada diez años. De esta forma en 2015 tendremos discos que serán capaces de mantener 1 TB por centímetro cuadrado, en 2025 se llegará a los 5 TB/cm^2 , en 2035 a los 25 TB/cm^2 , etc. Este rápido aumento de la capacidad de los discos duros ha traído consigo un considerable abaratamiento del almacenamiento de datos hasta el punto que es posible conseguir varios GB gratuitos en muchos proveedores de servicios en Internet. ¿Quién iba a imaginar todo esto hace veinte años?

La nanoelectrónica ha seguido acelerando la invasión de procesadores y discos duros, y ha irrumpido con fuerza en otros sectores, como el de las pantallas planas. En los últimos quince años hemos asistido a una evolución permanente de las pantallas tras la decadencia y extinción de los monitores basados en tubos de rayos catódicos, surgiendo las pantallas de plasma, TFT (del inglés, *Thin Film Transistor*), LCD (*Liquid Crystal Display*), para llegar a las basadas en dispositivos LED, denominadas así por el uso de diodos semiconductores emisores de luz o LEDs (*Light-Emitting Diode*). Aunque los diodos LED se inventaron en los años sesenta, ha sido recientemente cuando se ha podido dominar la emisión de una amplia gama de colores

con alta intensidad gracias a la adecuada selección de los materiales semiconductores como el arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs), o el arseniuro fosfuro de galio (GaAsP) entre muchos otros. El control necesario para la fabricación e integración de estos LED se alcanza con técnicas prácticamente idénticas a las empleadas en la fabricación de procesadores, utilizando los conocimientos proporcionados por la nanotecnología. Por cierto, los dispositivos LED también han revolucionado el sector de la iluminación debido a su menor consumo con respecto de las bombillas incandescentes basadas en tecnologías fundamentadas hace más de un siglo. En el año 2007, el gobierno de EE.UU. promulgó una ley que ponía fin a la fabricación y al uso de las bombillas incandescentes en el año 2011, aunque posteriormente se amplió un año más este periodo. Ese mismo año una norma similar entró en vigor en la Unión Europea. De esta forma, las bombillas incandescentes pasaban a ser parte de nuestra historia tras más de un siglo de iluminar nuestras vidas, que a partir de ahora serán iluminadas por la nanotecnología.

5.5. ¿El fin de la nanoelectrónica del silicio?

Con los argumentos y ejemplos expuestos hasta ahora debe quedar claro que la posibilidad de hacer las cosas más pequeñas y con una gran precisión, esencia última de la nanotecnología, ha sido un elemento consustancial de la microelectrónica durante medio siglo, hasta llegar a convertirse en la nanoelectrónica. En este viaje, la irrupción de la nanoelectrónica basada en semiconductores, fundamentalmente silicio, ha permitido mejorar los dispositivos electrónicos a la vez que se mantenían los costes de los productos o servicios finales. Por ejemplo, la resolución de una cámara digital (en cuanto a número de píxeles) se duplica cada dieciocho meses aunque su precio se mantiene constante (esto se conoce como Ley de Hendys). La rápida evolución de la electrónica también es responsable de que cada nueve meses la capacidad de las fibras ópticas se duplique (a lo que se denomina Ley de Butters) o de que la velocidad de acceso a Internet se duplique cada veintiún meses (a lo que se denomina Ley de Nielsen). Este fulgurante avance ha permitido que toda nuestra sociedad actual, la de la información, pivote en torno al uso intensivo de multitud de dispositivos electrónicos que nos permiten acceder rápidamente a todo tipo de datos, realizar complejos cálculos o sofisticadas presentaciones gráficas, jugar con nuestros amigos *online*, y todo ello con menos consumo y una mayor portabilidad, abriendo nuevas formas de trabajo, de aprendizaje, de ocio y de relación personal. También sabemos que no todo es positivo, ya que estas tecnologías generan adicciones y han dado lugar a nuevas formas de crimen

(ciberacoso, estafas, ciberataques, espionaje), pero de esto no tienen la culpa ni los semiconductores, ni los electrones, ni la litografía electrónica. Como ocurre con cualquier tecnología, su uso siempre manifiesta dos caras y ya veremos más adelante que la propia nanotecnología no escapa a esta dualidad.

La fabricación de componentes electrónicos basados en el uso del silicio ha alcanzado un refinamiento sin precedentes en la historia de la humanidad. En realidad se habla de la tecnología del silicio, pero hay que mencionar que al menos un par de decenas de elementos químicos (aluminio, oxígeno, nitrógeno, fósforo, cobre, hafnio, etc.) forman parte, en menor medida, de los dispositivos electrónicos. Como se ha mencionado antes, para llegar a este grado de sofisticación en el diseño y fabricación de los chips, se han ido superando barreras tecnológicas que han permitido mantener el ritmo de miniaturización. A finales de los años noventa se pronosticaba que no se podría bajar de los 180 nm (referidos al tamaño del canal de un transistor). Sin embargo, la incorporación de nuevos materiales como cobre o hafnio, el desarrollo de nuevas estrategias litográficas o la llegada de las arquitecturas 3D han permitido que la tecnología del silicio se mantenga viva, como demuestra el cumplimiento de la Ley de Moore. Sin embargo, sabemos a ciencia cierta que estas tecnologías tarde o temprano tendrán un estancamiento y posterior declive.

En la Figura 5.5 se muestran tres típicas curvas en «S» que describen las fases que tienen lugar en cualquier innovación. En este caso se aplican a la evolución de la electrónica de vacío, la electrónica de estado sólido basada en silicio y la electrónica «postsilicio». En cada uno de los casos siempre tiene lugar una fase inicial exploratoria, concentrada en los laboratorios y la creación de demostradores, en la que se produce una lenta irrupción de una nueva tecnología. Posteriormente sigue una fase de ascenso explosivo en la que la nueva tecnología desplaza a las otras tecnologías más obsoletas. Cuando la tecnología es ampliamente validada y se ha mejorado tras su interacción con el mercado, entonces es adoptada rápidamente por una gran cantidad de empresas que realizan mejoras sustanciales para proporcionar el mayor valor añadido posible en su sector de aplicación. En un momento dado la tecnología alcanza su madurez, las mejoras son meramente incrementales y el ritmo con el que se introducen se va ralentizando, comenzando una etapa de saturación. Se puede decir que el conjunto de técnicas y métodos que están detrás de las tecnologías del silicio están en su fase de madurez, pero las propias empresas fabricantes de semiconductores y dispositivos derivados ya vislumbran la entrada en la fase de saturación, en la que parece que los conocimientos y técnicas acumulados no podrán resolver ciertos problemas.

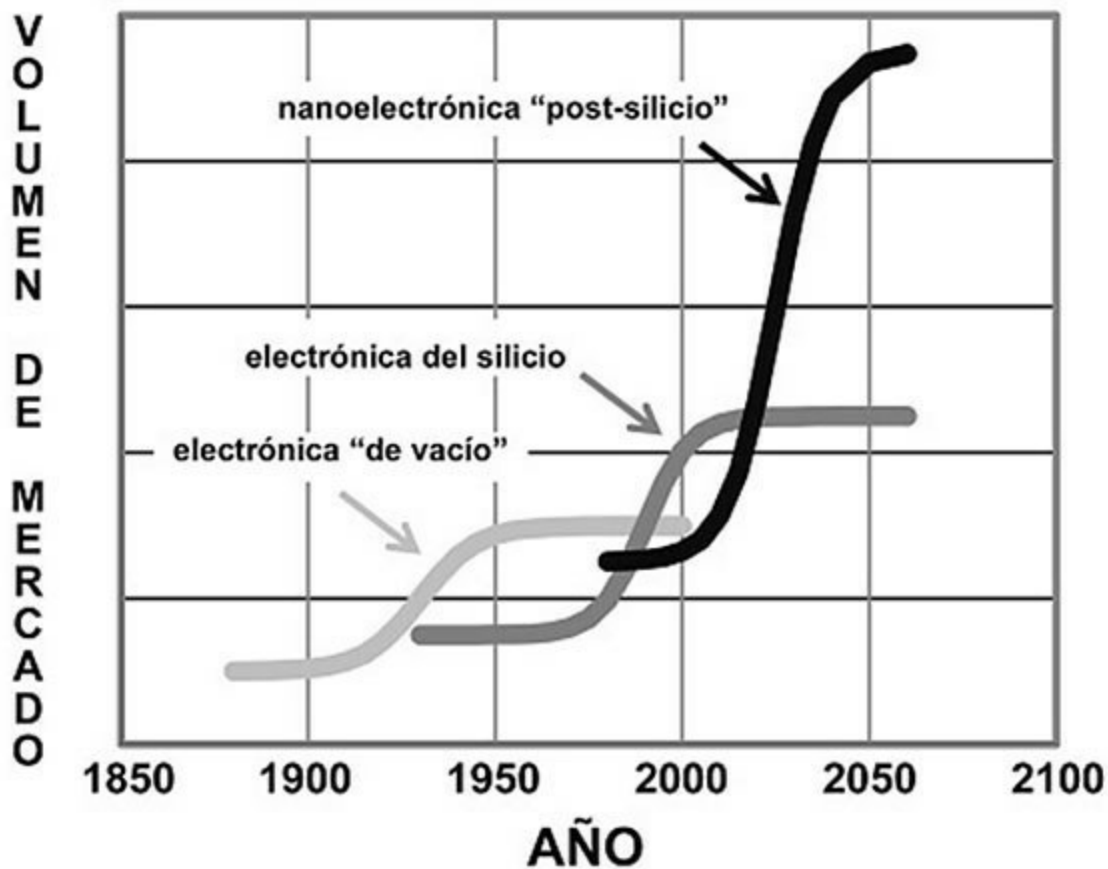


FIGURA 5.5. Curvas «S» de la innovación para la electrónica de vacío, la actual electrónica basada en el silicio y la electrónica basada en las nanotecnologías que no emplearán el silicio.

¿Qué problemas aquejan a la potente industria de la nanoelectrónica en estos inicios del siglo XXI? Hay varios puntos problemáticos que vamos a repasar brevemente. En primer lugar podemos mencionar el problema de la gran disipación de calor que un procesador produce. Si lo pensamos detenidamente, un procesador con unos pocos centímetros cuadrados de superficie y que requiere 150 W de potencia (que se manifiesta finalmente en el calor que hay que disipar) es bastante similar, desde el punto de vista del calentamiento, a una placa vitrocerámica de igual superficie. Otro problema que se presentará con más frecuencia a medida que se diseñen componentes más pequeños y que estén más próximos entre sí, es el de las pérdidas de corriente debidas a los saltos de los electrones de un componente a otro. Los electrones de un dispositivo pueden adquirir energía suficiente para poder traspasar barreras mediante efecto túnel (efecto propio de la mecánica cuántica y en el que se basan los microscopios descritos en el Capítulo 3). Por culpa de estas pérdidas los componentes dejarían de funcionar de la forma para la que fueron diseñados. Otro problema que se hace patente a medida que los sistemas se hacen más pequeños y están más cercanos los unos a los otros es que las acumulaciones de carga que aparecen en un componente pueden influenciar el comportamiento de los componentes vecinos haciendo que su

funcionamiento no sea el planificado (a esto se le llama «acoplamiento capacitivo»). Por otro lado, la necesidad de trazar mediante técnicas fotolitográficas motivos nanométricos usando luz de longitud de onda más y más pequeña presenta cada vez más y más dificultades que no sólo tienen que ver con las limitaciones óptica del haz de luz, sino con las fotorresinas empleadas o la complejidad de combinar muchas técnicas sobre intrincados diseños 3D.

Otro aspecto que hay que mencionar tiene que ver con el dopado del silicio. Para mejorar las propiedades conductoras del silicio es necesario dopar o contaminar el silicio puro con otros elementos químicos (llamados dopantes) que proporcionan electrones o «huecos» adicionales. Un hueco es un tipo especial de portador de carga positiva que en realidad representa la ausencia de una carga negativa. De esta forma se logran semiconductores de «tipo n» (con elementos dopantes como el fósforo o el arsénico que proporcionan electrones) y de «tipo p» (con dopantes como el galio o el boro que proporcionan huecos). La densidad típica de los elementos dopantes es de 10^{13} - 10^{18} átomos por cada cm^3 del material anfitrión. Es fácil intuir que a medida que los transistores de silicio tengan partes más y más pequeñas van a ocurrir dos cosas. Cuando el tamaño típico de un bloque de silicio dopado es inferior a los 50 nm es muy difícil controlar que su dopado sea homogéneo (es decir, que los átomos dopantes se repartan por igual en el silicio). Por otro lado, cuando un componente posea regiones de silicio dopado con tamaños inferiores a los 10 nm nos encontraremos con serias dificultades para encontrar átomos dopantes y portadores de carga disponibles. En este último caso, si no hay electrones ni huecos es evidente que ya no tiene sentido hablar de dispositivos electrónicos puesto que ¡no hay electrones que transportar!

La falta de portadores de carga no es el único motivo que puede conducir a la etapa de saturación de la industria nanoelectrónica basada en el silicio. Hay otros, como los relacionados con los costes de producción. Cada vez que se quiere incluir en la cadena de producción una serie de mejoras tecnológicas con la que lograr una nueva línea de productos basados en transistores de menor tamaño, se requiere una gigantesca inversión tanto en investigación básica como en la puesta a punto de las técnicas y herramientas de fabricación en masa. Por ejemplo, Intel invirtió 10 000 millones de dólares durante 2012-2013 para la puesta en marcha de un gran complejo de producción, llamado FAB 42 y situado en Arizona (EE.UU.), con el que inundará el mercado de sus nuevos chips basados en la nanotecnología de 22 nm. Por supuesto, recuperar la inversión y tener ganancias implica que hay que producir y vender muchos cientos de millones de procesadores y memorias. Mientras no se obtenga un claro rendimiento de las inversiones efectuadas para construir las fábricas que permiten poner en mercado una cierta tecnología, difícilmente se pondrán en marcha las nuevas

plantas que fabriquen componentes de los procesadores de menor tamaño. Por tanto existen unas limitaciones económicas a la Ley de Moore.

También debe mencionarse otro aspecto que incide en los costes de fabricación de los dispositivos electrónicos: la necesidad de usar materiales de altas prestaciones pero que en ocasiones son muy escasos. Un ejemplo lo encontramos en el tantalio, elemento estratégico que tiene muchas aplicaciones entre las que destaca su uso en la fabricación de condensadores en dispositivos electrónicos. El tantalio se extrae fundamentalmente del coltán que es una combinación de dos minerales, la columbita (óxido de niobio con hierro y manganeso) y la tantalita (óxido de tantalio con hierro y manganeso). Sin embargo las reservas de coltán se encuentran principalmente concentradas en la República Democrática del Congo, país que sufre un grave conflicto bélico avivado por el control de la explotación de este mineral. Por esta razón la industria electrónica intenta buscar alternativas para el uso de materiales escasos y costosos.

Varios estudios recientemente elaborados por las asociaciones que reúnen a las principales empresas de electrónica, prevén que la tecnología del silicio podrá seguir siendo utilizada hasta el año 2020, lográndose entonces unas densidades de empaquetamiento cercanas a los 250 000 millones de transistores por chip, ¡125 veces mayores que las que encontramos en los procesadores actuales! ¿Qué ocurrirá después del año 2020? Aunque no disponemos de una bola de cristal con la que realizar esta predicción, la industria de la electrónica propone tres rutas alternativas que permitan mantener su negocio más allá de esa fecha.

La primera estrategia consiste en profundizar aún más en las tecnologías basadas en el silicio, exprimiéndolas al máximo, llevando a sus límites las metodologías de tipo CMOS (del inglés, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*), llamadas así porque combinan materiales semiconductores y óxidos metálicos. Esto se lograría gracias a la incorporación de nuevos materiales de alta constante dieléctrica, arriesgados diseños 3D en los transistores, procesadores con cientos o miles de núcleos de computación, o revolucionando los métodos litográficos mediante propuestas como la litografía por nanoimpresión (*nanoimprinting*) en las que se utilizan moldes con motivos nanométricos para «estampar» los circuitos. Esta estrategia se denomina usualmente «More Moore» («más Moore»). La tecnología de 22 nm que va a llegar a nuestros equipos electrónicos y computadores personales en los próximos años es resultado de esta estrategia, donde los avances son incrementales, es decir dando pequeños pasos en la misma dirección.

Otra alternativa consiste en aprovechar todos los conocimientos técnicos adquiridos para el desarrollo de la nanoelectrónica basada en el silicio con el fin de fabricar otro

tipo de dispositivos con incidencia en otros sectores. Esta estrategia se denomina «More than Moore» («más que Moore») y se dirige a la fabricación de transductores (sistemas que convierten una señal luminosa o mecánica en otra eléctrica) para ser utilizados en pantallas táctiles, nanodispositivos electromecánicos (denominados NEMS) que permitan fabricar nanosistemas móviles, biosensores, micro y nanoarrays o dispositivos *lab-on-a-chip* que son auténticos laboratorios en miniatura donde se realizan experimentos biológicos. Estos nuevos sistemas ya se mencionan en otros capítulos y tienen gran interés en automoción, seguridad, biotecnología, medicina, telefonía móvil, energía fotovoltaica, etc.

Finalmente, la tercera vía es la más disruptiva, pues propone el abandono del silicio como «alma máter» de la electrónica y la búsqueda de otros materiales con los que desarrollar una electrónica radicalmente nueva. Esta aproximación se conoce como «Beyond Moore» («Más allá de Moore») y su curva «S» de la innovación también se muestra en la Figura 5.5. Más adelante hablaremos de los materiales que serán la base de la electrónica sin silicio, pero antes, en la próxima sección, vamos a describir algunas de las características que presenta el transporte electrónico en estos materiales, para entender las ventajas y dificultades que tendrá este salto tecnológico.

5.6. El movimiento de los electrones en la nanoescala

La posible revolución en la nanoelectrónica tendrá como protagonistas a algunos de los «nanobjetos» que hemos descrito en capítulos anteriores. Sin embargo, el transporte electrónico en estos nanobjetos presenta unas propiedades que debemos conocer y dominar antes de pensar en su aplicación en dispositivos. Como hemos visto anteriormente los efectos de tamaño son responsables del cambio de muchas propiedades físicas y químicas a medida que el tamaño de los objetos disminuye. La manera en la que se mueven los electrones en un material tampoco es una excepción y los nanobjetos muestran interesantes efectos de tamaño en sus propiedades eléctricas.

En un cable metálico convencional, como el hilo de cobre que se usa en una instalación eléctrica, los electrones se mueven cuando aplicamos una diferencia de potencial, o voltaje, V , entre sus extremos usando una batería. La presencia de una fuerza, de origen eléctrico en este caso, provoca la aceleración de los electrones con el consiguiente aumento de velocidad. Sin embargo, este incremento de velocidad se ve truncado porque los electrones experimentan colisiones en las que pierden energía que se cede al material. Se dice que estas colisiones son de tipo inelástico. La energía cedida al material causa su calentamiento que es lo suficientemente intenso como para

provocar su incandescencia, que es lo que le ocurre precisamente al filamento de las bombillas que se van a dejar de fabricar. Tras la colisión, el electrón que ha perdido su energía vuelve a acelerarse por acción del campo eléctrico hasta que sufre una nueva colisión, cediendo otra vez la energía al material. A nuestra escala, un cable transporta la corriente eléctrica de una manera continua, como fluye el agua en un río, pero si observásemos el transporte electrónico en la nanoescala comprobaríamos que los electrones tienen una vida bastante agitada, con continuas aceleraciones y colisiones.

Aunque parezca sorprendente los electrones no colisionan directamente con los átomos que forman el material en el que se mueven sino con los defectos e impurezas presentes en el mismo y, fundamentalmente, con los átomos que se han desplazado ligeramente de sus posiciones de equilibrio. Expliquemos esto último con un poco más de detalle. En realidad un electrón puede propagarse fácilmente por una red de átomos si éstos muestran una estructura perfectamente periódica y ordenada, lo que se llama una red cristalina. En este caso, la periodicidad da lugar a un conjunto de niveles de energía que forman regiones o bandas permitidas de energía. Dichas bandas de energía permitidas son la que el electrón usa para desplazarse sin coste alguno. Por otro lado, al electrón le es imposible desplazarse con ciertas energías (las llamadas bandas prohibidas de energía). La existencia de bandas permitidas y prohibidas es un hecho que no debe sorprendernos ya que, por ejemplo, en un átomo sabemos que hay ciertos valores de energía que están permitidos (los llamados niveles de energía) y hay conjuntos de valores de la energía que no son accesibles. La aparición de bandas o niveles permitidos y prohibidos corresponde a situaciones de interferencia constructiva y destructiva, respectivamente, pues no olvidemos que el electrón tiene carácter ondulatorio y sigue las reglas de la mecánica cuántica. Sin embargo la red cristalina por la que se mueven los electrones no es perfectamente periódica y ordenada, ya que los átomos del metal se mueven, por lo general, siguiendo unas oscilaciones colectivas parecidas a las que podríamos observar en un conjunto de esferas enganchadas unas a otras mediante muelles. Dichas vibraciones, que son las responsables de la propagación del sonido en los materiales, se llaman fonones, palabra que deriva del término griego «fonós» que significa sonido o voz. En presencia de estas oscilaciones, la estructura cristalina deja de serlo y se distorsiona un poco, haciendo que los niveles electrónicos se modifiquen continuamente provocando cambios en la energía y en la dirección de propagación de los electrones. Es decir, causando colisiones que impiden la propagación libre de los electrones a través de la estructura cristalina dando lugar a una ralentización del movimiento del conjunto de los electrones.

Esta oposición al movimiento electrónico es lo que en la práctica se denomina resistencia eléctrica, R , y es una propiedad característica de cada material. La relación

entre la intensidad de corriente I que circula por el cable y el voltaje aplicado V se denomina Ley de Ohm y se expresa con la familiar fórmula $V=I \times R$ que muchos recuerdan de su educación secundaria. Cuando la temperatura del material aumenta, la energía cinética de los átomos también lo hace, provocando que éstos oscilen con una mayor amplitud, causando distorsiones mayores en la red cristalina y, por lo tanto, un aumento en el número de colisiones electrónicas. Como resultado del aumento de temperatura la resistencia crece, siendo éste un comportamiento característico de los materiales metálicos.

En un cable como los que se usan en aparatos eléctricos convencionales hay trillones de electrones moviéndose en una alocada secuencia de colisiones y posteriores aceleraciones. Para caracterizar el movimiento de los electrones se suele utilizar una magnitud estadística denominada «recorrido libre medio inelástico», que se define como la distancia promedio que una partícula recorre entre dos colisiones consecutivas. Por ejemplo, en un hilo de cobre a temperatura ambiente ($T=300\text{K}$), el recorrido libre medio inelástico es de unos 39 nm. Es decir, típicamente el electrón sufre decenas de miles de colisiones para recorrer tan sólo un milímetro. Cuando la temperatura baja, las oscilaciones de los átomos son menores y la probabilidad de colisión decrece, por lo que el recorrido libre medio aumenta. Por ejemplo, si la temperatura del anterior hilo de cobre fuese 10 K (aproximadamente $-263\text{ }^\circ\text{C}$) el recorrido libre medio aumentaría hasta casi 4 μm . Es decir, a muy bajas temperaturas, el electrón viaja grandes distancias sin impedimentos. Ésta es una de las razones por las que hay muchos físicos realizando experimentos en sistemas a bajas temperaturas, evitando las molestas perturbaciones ocasionadas por las vibraciones atómicas.

Bien, ya sabemos lo que ocurre en un cable macroscópico, pero ¿qué ocurriría si nuestro cable tuviese unas dimensiones nanométricas? Supongamos, por ejemplo, que tenemos un equipo capaz de fabricar un nanocable de 20 nm de diámetro y 30 nm de longitud a temperatura ambiente, y luego otro equipo capaz de medir la resistencia de este diminuto cable a temperatura ambiente. Como su tamaño es inferior al recorrido libre medio de los electrones, es muy probable que los electrones lo atraviesen sin experimentar colisiones. Pero, si los electrones no sufren colisiones ¿tiene sentido hablar de resistencia tal como se recoge en la Ley de Ohm? Evidentemente no, lo que quiere decir que esta ley que usamos habitualmente para entender cómo funcionan los circuitos eléctricos no es adecuada para explicar el transporte de electrones en la nanoescala. Dado que no hay resistencia óhmica, el transporte deja de ser óhmico y ahora se denomina balístico. En este caso sigue existiendo cierta oposición al movimiento de los electrones pero ahora está causada por las colisiones con los defectos que hay presentes en el sistema en lugar de con los átomos que se desplazan

ligeramente de su posición. Ejemplos de defectos son las denominadas «vacantes» (falta de un átomo del lugar en el que tendría que estar) o las impurezas de otro elemento químico. Otra fuente de resistencia al paso de los electrones es la presencia de las superficies que limitan el nanocable ya que pueden entenderse como un gran «defecto» o un defecto extendido. En conjunto, las colisiones de los electrones con todos estos defectos del material dan lugar a una «resistencia balística». Un aspecto importante del transporte balístico es que durante el movimiento electrónico se reduce considerablemente la disipación de calor en comparación con el transporte óhmico, por lo que se abre una puerta para diseñar y fabricar dispositivos electrónicos más eficientes. El esquema mostrado en la Figura 5.6 ilustra la diferencia entre el comportamiento óhmico y balístico.

Hasta ahora hemos visto que cuando se trabaja en el nanomundo necesitamos cambiar de modelo teórico para explicar el transporte eléctrico. Lo «nano» vuelve a ser diferente. El transporte electrónico a través de estos pequeños hilos o cables no sólo presenta interesantes efectos balísticos sino que también está sometido a efectos cuánticos. La forma en que un nanohilo transporta la corriente se hace más complicada a medida que su diámetro decrece pues el movimiento de los electrones se ve afectado por su confinamiento en la dirección perpendicular al eje del hilo. La mecánica cuántica predice que cuando tenemos una partícula confinada en lo que llamamos un pozo de potencial (en nuestro caso el nanohilo), la energía de esta partícula sólo puede tomar un conjunto de valores discretos denominados niveles de energía permitidos. Estos niveles de energía se dan, por ejemplo, en los átomos como ya hemos mencionado anteriormente. En el caso de hilos muy estrechos, el confinamiento hace que únicamente unos cuantos niveles estén disponibles para el transporte electrónico. A dichos niveles también se les llama «canales» de transporte electrónico. El físico R. Landauer formuló la teoría del transporte electrónico en estos sistemas y proporcionó la fórmula alternativa a la Ley de Ohm para el transporte electrónico. En este modelo, la resistencia de un nanohilo cuántico depende de forma directa de las probabilidades de transmisión asociadas a los canales disponibles para el transporte electrónico. Si los canales tienen probabilidades de transmisión pequeñas, entonces la resistencia será grande. Si los canales poseen probabilidades de transmisión grandes entonces el nanocable tendrá una resistencia pequeña.

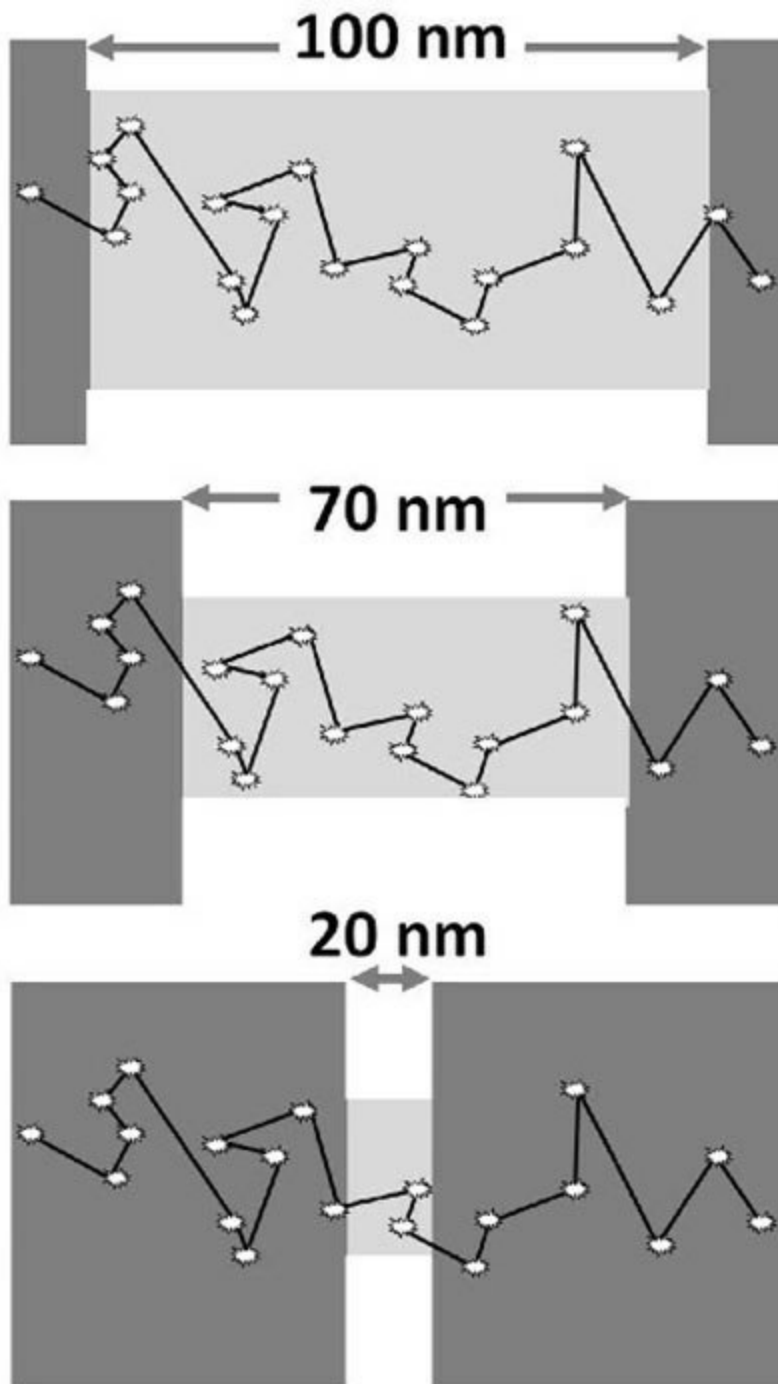


FIGURA 5.6. Esquema que ilustra la diferencia entre transporte balístico y óhmico. Las trayectorias de los electrones se representan con trazos negros y las colisiones inelásticas con figuras con forma de estrella. A medida que el nanocable (zona representada por un estrechamiento de color gris claro) se hace más corto y estrecho las colisiones inelásticas se hacen menos frecuentes en su interior, y el transporte electrónico pasa de ser óhmico (muchas colisiones inelásticas) a balístico (escasas colisiones inelásticas).

Por lo tanto, cuando un nanobjeto, como los que vamos a describir en la sección siguiente, transporta la corriente eléctrica puede manifestar efectos balísticos y cuánticos, obligándonos a abandonar la Ley de Ohm para describir sus propiedades eléctricas y siendo necesario emplear una nueva formulación, la propuesta por R.

Landauer. Esto tiene como consecuencia un cambio radical a la hora de diseñar y construir los circuitos electrónicos en los que se inserten nanocomponentes. Parte del *software* que hoy en día se utiliza para definir la arquitectura de complejísimos circuitos electrónicos dejará de ser válido dentro de unos pocos años y habrá que programar sofisticados códigos que tengan en cuenta la naturaleza cuántica del transporte electrónico. Los futuros ingenieros de nanocircuitos serán «ingenieros cuánticos», no van a tener otra opción.

5.7. La nanoelectrónica sin silicio

La nanoelectrónica basada en el silicio tiene todavía por delante unos cuantos años de éxito y seguirá ofreciéndonos dispositivos cada vez más sofisticados. Pero, mientras esto ocurre, los laboratorios de investigación de todo el mundo están buscando nanobjetos que se conviertan en candidatos fiables para reemplazar al silicio. Todos tendrán en común su tamaño nanométrico y su sorprendente forma de transportar electrones combinando efectos balísticos y cuánticos. Vamos a describir con brevedad algunas de las líneas de investigación más importantes dedicadas a la búsqueda de estos candidatos.

La electrónica molecular. Desde el descubrimiento de los polímeros conductores a finales del siglo XX, se han desarrollado una gran cantidad de dispositivos inspirados en estos materiales debido a su carácter multifuncional por ser conductores, flexibles y transparentes. Este tipo de materiales se describirán con más detalle en el capítulo siguiente. Entre estos dispositivos tenemos los diodos orgánicos emisores de luz (OLED, siglas de *Organic Light-Emitting Diode*), los transistores orgánicos de efecto campo (OFET, siglas de *Organic Field-Effect Transistor*) o los paneles fotovoltaicos orgánicos. Por ejemplo, un grupo de la Universidad Autónoma de Madrid ha propuesto el uso de paneles solares basados en diferentes moléculas derivadas de la ftalocianina, una molécula que tiene carácter semiconductor. Dichos paneles tendrían rendimientos inferiores a los que actualmente proporcionan los basados en el silicio, pero tendrían como gran ventaja su menor coste: menos de 20 céntimos de euro el metro cuadrado. Los polímeros conductores también se están considerando para la fabricación de baterías, músculos artificiales o diversos tipos de sensores.

Los polímeros conductores están basados en diferentes tipos de moléculas «electroactivas», denominadas así por ser capaces de reaccionar frente a estímulos

eléctricos. Existen multitud de familias de moléculas electroactivas, como las derivadas de polipirrol, naftaleno, fullereno, tetracianoquinodimetano (TCNQ), tetratiofulvaleno (TTF), etc. Estas moléculas de dificultosos nombres tienen en común su capacidad para transportar carga eléctrica. Pensemos ahora, por un momento, que somos capaces de construir dispositivos que contengan unas cuantas moléculas electroactivas o vayamos más allá, e imaginemos que una sola de estas moléculas se diseña para comportarse como un dispositivo completo. Por ejemplo, un grupo de la Universidad de Delft (Holanda) está trabajando en el diseño de un nanomotor molecular basado en una molécula que es capaz de rotar en presencia de un campo eléctrico alterno a diferentes velocidades de rotación. En este caso estaríamos hablando de una nueva electrónica, la electrónica molecular.

En un futuro construiremos nanotransistores moleculares a partir de diferentes tipos de moléculas electroactivas que tengan bien carácter metálico o bien carácter rectificador (es decir, un sistema que deje pasar la corriente en un sentido pero no en el contrario). En otras ocasiones las moléculas reaccionarán frente a la luz o a campos magnéticos por lo que podrán ser usados como transductores electro-ópticos o como memorias. Investigadores de diferentes universidades o de empresas como IBM o Hewlett-Packard ya han diseñado circuitos en los que las moléculas realizan las funciones de transistores o de conmutadores (*switches*) moleculares. Una de las moléculas que puede ser candidata para la fabricación de interruptores moleculares es el rotaxano, molécula con la que en 2007 se construyeron prototipos de laboratorio para su uso como dispositivos de almacenamiento de datos. Las propiedades de esta molécula se describen con más detalle en el Capítulo 6. Desde el punto de vista de la fabricación masiva de dispositivos, el uso de moléculas es muy sugerente pues podrían utilizarse los métodos de autoensamblado molecular de los que también se hablará en el capítulo siguiente. Este tipo de procesos permitiría cubrir de manera relativamente sencilla toda una superficie con un gran número de moléculas activas, aumentando la capacidad de los dispositivos fabricados. Una de las desventajas de este tipo de materiales es su relativa fragilidad y la pérdida de sus propiedades con el paso del tiempo. En cuanto estos problemas se resuelvan, las moléculas orgánicas podrán ser serias candidatas para sustituir al silicio tanto en electrónica como en generación fotovoltaica.

La nanoelectrónica del carbono: nanotubos. Ya hemos visto anteriormente que los nanomateriales basados en carbono son grandes protagonistas de la nanotecnología. Los nanotubos de carbono pueden transportar balísticamente corriente eléctrica sin apenas

resistencia. La densidad de corriente máxima que un nanotubo de carbono puede transportar es centenares de veces superior a la de un cable metálico de igual sección. Además sus excelentes propiedades mecánicas permiten su uso en sistemas que trabajen en condiciones extremas. A todo esto hay que sumar el hecho clave de que los nanotubos de carbono pueden tener carácter metálico o semiconductor en función de su geometría, lo que facilitará su introducción en distintas partes de los chips, simplificando el número de pasos requerido en la fabricación de circuitos integrados. La expectación sobre el uso de los nanotubos ha crecido y su precio ha ido bajando a medida que grandes fábricas de nanotubos se han ido poniendo en marcha en Japón, Francia, EE.UU., etc. En la Figura 5.7 se muestra el esquema de un transistor basado en un nanotubo de carbono. A principios de 2012, IBM anunció que había conseguido fabricar un transistor de este tipo con un canal de 9 nm de tamaño, muy inferior a los 22 nm de canal de los transistores que representan ahora mismo la vanguardia de la tecnología del silicio. A finales de 2013, un grupo de investigación de la Universidad de Stanford (EE.UU.) anunció la fabricación, aún un tanto artesanal, de un procesador que contenía 142 transistores ensamblados a partir de nanotubos de carbono. Aunque este procesador tiene una potencia de cálculo similar al de los procesadores basados en silicio fabricados a principios de los años setenta, es una demostración palpable de que ya es posible comenzar a pensar en computadoras de carbono.

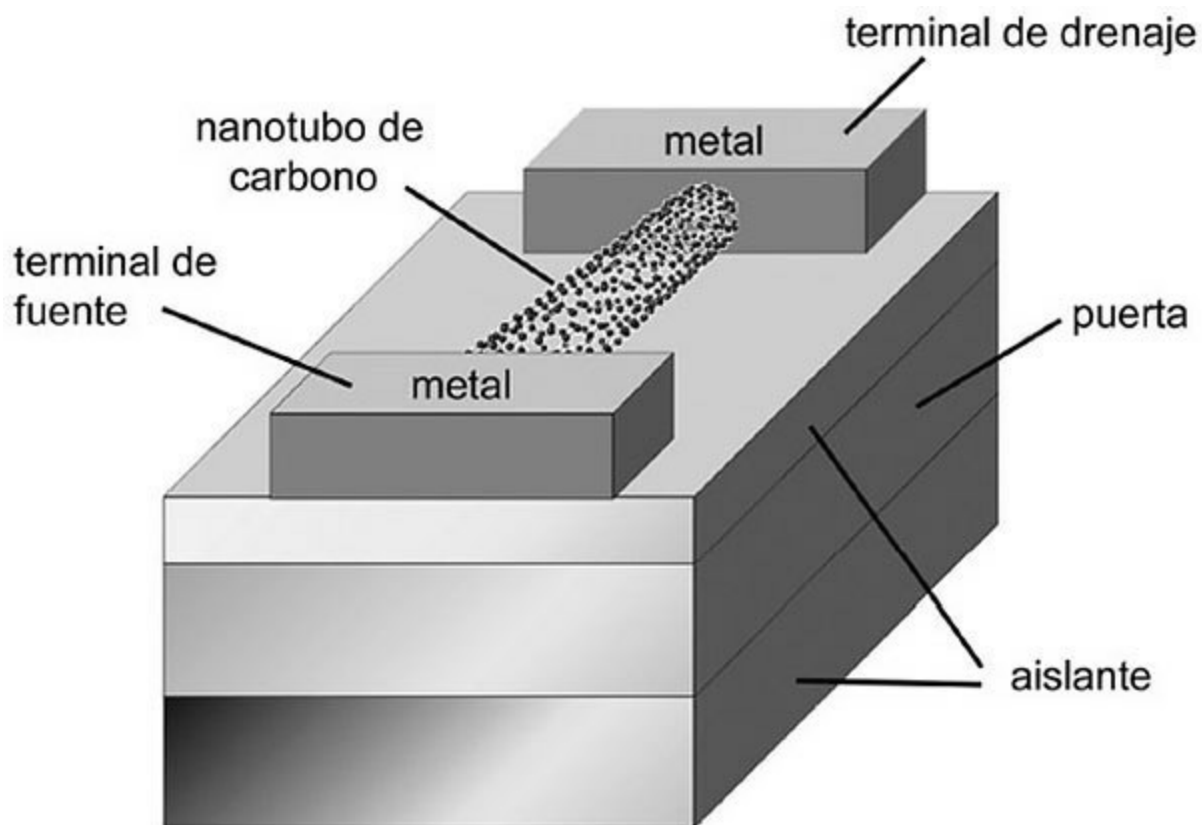


FIGURA 5.7. Esquema de un transistor de efecto campo basado en un nanotubo de carbono que se convierte en el canal por el que circulan los electrones en función del voltaje aplicado a la puerta.

La nanoelectrónica del carbono: grafeno. Por su parte el grafeno ha entrado recientemente en la escena de la electrónica de la mano de sus impresionantes propiedades, entre las que podemos destacar una gran movilidad de los electrones y una bajísima resistividad. Los descubrimientos sobre el grafeno aparecen a un ritmo sin precedentes. En febrero de 2010, IBM presentó un prototipo de transistor de grafeno capaz de funcionar a 100 GHz (treinta veces más rápido que los procesadores comerciales de silicio que usamos en nuestros computadores personales). Ese mismo año un grupo de Corea del Sur sintetizó, como ya se ha descrito, una lámina rectangular de grafeno de 74 cm de diagonal diseñada para su posible utilización en una pantalla táctil de grandes dimensiones. En los laboratorios de todo el mundo se estudian diferentes maneras de manipular una lámina de grafeno, cómo doparla usando diversos tipos de átomos, o cómo oxidarla de forma controlada en lugares concretos o cortarla formando los patrones deseados. Todas estas operaciones permitirán definir circuitos bidimensionales ultradelgados con los que fabricar transistores u otros componentes sobre superficies flexibles y casi transparentes. El grafeno, junto con los polímeros conductores, abren una nueva vía para fabricar dispositivos: la electrónica flexible. Esta estrategia permitirá la fabricación de procesadores, pantallas planas y células solares, casi transparentes, que serán capaces de doblarse o enrollarse, adaptándose mejor a diferentes superficies. Imaginemos por un momento que la superficie de una ventana o la cubierta de un invernadero se convierten en un generador de energía fotovoltaica, que la cúpula, las bóvedas o las columnas de los edificios se convierten en pantallas donde mostrar información, o que una lentilla es capaz de albergar un procesador y una diminuta pantalla en la que mostrar todo tipo de datos. Con todos los ejemplos que hemos expuesto es evidente que la posibilidad de elaborar circuitos basados en nanotubos de carbono y grafeno es una de las grandes apuestas para dar el salto desde la tecnología del silicio hasta la del carbono.

Nanohilos inorgánicos. Otras nanoestructuras que tendrán su nicho de aplicación en el campo de la nanoelectrónica son los nanohilos o nanocables metálicos que servirán para establecer conexiones entre los elementos que se encuentran en un dispositivo. Desde hace casi dos décadas se sabe formar y manipular cadenas de átomos ordenados en fila india. Éstos son los nanocables más pequeños del mundo. Además de ser excelentes conductores de la electricidad tienen otras interesantes propiedades. Por ejemplo, si el material del que está hecho el nanocable es magnético (cobalto, hierro o

níquel) puede presentar efectos de magnetorresistencia gigante, por lo que podrían usarse en la fabricación de sensores magnéticos. Además pueden ser utilizados como nanoantenas que se integrarían en los procesadores, permitiendo comunicaciones inalámbricas entre diferentes dispositivos o entre diferentes componentes de un mismo procesador, proporcionando más funcionalidad a los equipos electrónicos.

Puntos cuánticos. Un punto cuántico es una estructura cristalina formada usualmente por materiales semiconductores y que presenta dimensiones nanométricas y formas diversas. En un punto cuántico, los electrones están confinados en las tres dimensiones del espacio, dando lugar a una estructura bien definida de niveles de energía que depende mucho de la forma y del tamaño del punto cuántico. Esta estructura recuerda a la que tienen los átomos, por lo que los puntos cuánticos también reciben el nombre de «átomos artificiales». Al igual que los fullerenos, los puntos cuánticos se pueden clasificar como pertenecientes a la familia de estructuras 0D. Lo más interesante de un punto cuántico es que mediante el control de su composición, forma y tamaño podemos predeterminedinar su estructura electrónica y por lo tanto el espectro de la luz que emiten. El control de la luz que pueden emitir o absorber hace de los puntos cuánticos sistemas clave en la fabricación de diodos láser (usados como lectores de CD y DVD), células fotovoltaicas, marcadores ópticos para realizar el seguimiento de procesos en biomedicina, etc. Otro aspecto interesante de los puntos cuánticos está relacionado con los cambios en su estructura electrónica cuando un electrón es atrapado en su interior. Cuando esto ocurre, la incorporación de un segundo electrón se ve impedida por las enormes fuerzas de repulsión causadas por el confinamiento. Además, dicha repulsión modifica la estructura de niveles energéticos. Este hecho se aprovecha para construir transistores de un único electrón (SET, del inglés *Single Electron Transistor*), en los que la corriente sólo puede circular electrón a electrón ya que un nuevo electrón no puede entrar al transistor hasta que el anterior no salga del mismo. De esta manera se obtiene un dispositivo por el que la corriente eléctrica circula de una manera cuantizada. Es imposible encontrar transistores que consuman menos.

Ha quedado claro que en estos momentos hay un gran número de candidatos que pueden ser prometedores competidores del silicio. Sin embargo el tipo de material que se utilice en los futuros dispositivos electrónicos no dependerá sólo de sus excelentes propiedades para transportar electrones sino de los costes de su fabricación en masa y su integración en sistemas de mayor y mayor complejidad. Pensemos que cualquier nueva tecnología que desee competir con el silicio debe ser capaz de producir e integrar miles de millones de componentes de una forma más barata que la utilizada en

las actuales factorías. Mientras esto no ocurra, el cambio de paradigma, el salto de una curva «S» de la innovación a otra, no se producirá, por bellas que sean las propuestas que surjan de los laboratorios.

5.8. La caída del reinado de la electrónica

Podemos intuir cómo serán los computadores dentro de diez años, pero es mucho más complejo realizar predicciones para dentro de veinte o treinta años. Si miramos hacia atrás y nos situamos a principios de los años ochenta hubiese sido bastante difícil pensar en el actual desarrollo de Internet, en nuestros teléfonos móviles multifuncionales o en las redes sociales. No sin riesgo a equivocarnos, podemos intuir que a mediados del siglo XXI los procesadores y memorias que forman el corazón de los equipos informáticos utilizarán combinaciones adecuadas de silicio, grafeno, nanotubos de carbono y moléculas, formando complejas arquitecturas tridimensionales. Estos sistemas nanotecnológicos seguirán realizando operaciones lógico-matemáticas gracias a paquetes o pulsos de electrones que circularán por nanocircuitos obedeciendo las leyes de Landauer, que entonces seguramente se explicarán en libros de texto de bachillerato. Uno de los más reputados futuristas, el estadounidense R. Kurzweil, ha estimado que a mediados del siglo XXI un equipo de sobremesa, con un coste de 1000 dólares, tendrá la misma potencia de cálculo que la que se obtendría con el conjunto de todas las conexiones neuronales de todos los seres humanos que entonces pueblen la Tierra. Con dicha potencia estos equipos podrán gestionar complejísimas aplicaciones informáticas que ahora sencillamente desbordan nuestra imaginación. Este tipo de máquinas se comunicarán con nosotros a través de sofisticadas interfaces entre las que seguramente se encontrarán diversos tipos de bioimplantes. Estas interfaces serán la base de sofisticados sistemas de «realidad aumentada» que permitirán superponer elementos virtuales con diferente información sobre la visión del entorno físico real, creando una realidad mixta. Mediante estas máquinas podremos mantener el crecimiento exponencial de nuestras capacidades de cálculo y de interconectividad.

El discurso mantenido hasta ahora se ha centrado exclusivamente en la electrónica como base de las TIC, seguramente porque estamos viviendo en su pleno apogeo y resulta difícil salirse de esta corriente y sondear otras opciones. Es realmente asombroso pensar que detrás de cada golpe a una tecla de ordenador hay cientos de corrientes eléctricas y voltajes que hacen que una determinada operación se realice siguiendo unas precisas reglas matemáticas. Es conveniente señalar que lo importante

de las TIC es su capacidad para generar, procesar, transmitir y almacenar información, pero estos pasos no tienen que ser dependientes ni del uso del silicio, ni del carbono, ni de los mismísimos electrones. De los laboratorios continuamente surgen interesantes propuestas en las que los electrones dejan de ser los protagonistas del transporte y almacenamiento de información. A continuación describimos algunas de ellas.

Computadores fotónicos. Un claro ejemplo que se lleva desarrollando durante las últimas tres décadas es el uso de sistemas en los que la información se transmite usando pulsos de luz. Mediante una serie de materiales nanoestructurados es posible realizar diversas operaciones con haces luminosos, construyendo las mismas reglas lógicas y aritméticas que ahora se emplean con los pulsos electrónicos, así estos dispositivos operarían con «rayos» de luz en lugar de hacerlo con corrientes eléctricas. La ventaja de estas tecnologías es evidente: la gran velocidad a la que se procesaría la información, la de la luz. La desventaja está relacionada con la dificultad de disminuir el tamaño de los circuitos fotónicos y encontrar los materiales adecuados que ayuden a procesar la información óptica.

Espintrónica. Otra propuesta de la que se habla mucho en revistas especializadas se fundamenta en la utilización del «espín» de los electrones, una propiedad puramente cuántica de las partículas y que se puede equiparar con una rotación interna de las mismas. En el caso del electrón esta rotación interna tiene dos posibles estados, que denominamos «arriba» y «abajo», de forma que la información binaria ahora se puede asociar al espín de un electrón o de grupo de electrones. La «espintrónica» es la tecnología que nos va a permitir construir válvulas y otros elementos con los que poder manipular los espines de los electrones para poder realizar operaciones lógicas. La ventaja de la espintrónica es que se basa en el uso de electrones y, hoy en día, sabemos mucho sobre como manipularlos mediante campos eléctricos y magnéticos. Hace unos pocos años, investigadores de la Universidad de Twente, en Holanda, lograron manipular corrientes de electrones que poseían el mismo espín usando circuitos de silicio y a temperatura ambiente, lo que es indispensable para que los dispositivos espintrónicos sean una alternativa a los electrónicos. Recientemente un grupo de ingenieros de la Universidad de la Columbia Británica en Canadá ha controlado el espín de los electrones sin necesidad de utilizar campos eléctricos magnéticos o eléctricos, sino gracias al propio diseño del circuito y a las propiedades del transporte balístico de los electrones. Esto significaría un considerable ahorro en el diseño de los

futuros circuitos espintrónicos ya que no se requeriría la aplicación de campos externos en millones de regiones de un circuito para dirigir las corrientes de espín. Aunque son pequeños avances, aún queda mucho camino por delante para encontrar los materiales más adecuados, que junto con las adecuadas técnicas de fabricación, permitan producir en masa circuitos espintrónicos. Sin embargo, se debe destacar que el fenómeno de la magnetorresistencia gigante, que se ha mencionado anteriormente en este capítulo y que ha revolucionado el almacenamiento de datos, también se puede considerar un ejemplo del uso del espín electrónico. En cualquier caso se debe señalar que las herramientas que se están empleando para el desarrollo de la espintrónica pertenecen al ámbito de la nanotecnología.

Biocomputadoras. Hay otras propuestas que están mucho más alejadas del uso de cargas eléctricas, espines o luz, y son realmente revolucionarias. En una biocomputadora se emplean una serie de materiales biológicos y de secuencias metabólicas con un fin diferente al habitual: realizar «biooperaciones» aritméticas o lógicas. Se han propuesto diferentes tipos de biocomputadoras, pero quizás sean las computadoras bioquímicas las que más rápidamente se están desarrollando. Aunque el funcionamiento de estos sistemas es bastante complejo, su desarrollo se debe al profundo conocimiento actual del material genético y de las reacciones metabólicas. La idea de partida es fascinante: utilizar la codificación del ADN. De esta manera, las cuatro bases con las que se construyen las cadenas de ADN (adenina —A—, citosina —C—, guanina —G— y timina —T—) se emplearían como sistema «cuaternario» sobre el que codificar tanto las instrucciones como los datos de entrada de la misma forma que hoy en día se codifican procesos sobre sistemas binarios, de ceros y unos. Por ejemplo, una cadena de ADN podría codificar dos números y la operación suma que deseamos aplicar. Esto sería el *input* del proceso. Mediante una serie de reacciones bioquímicas con el resto de materiales biológicos presentes se obtendría, por ejemplo, una proteína concreta que una vez descodificada contendría el resultado equivalente a la suma. Si en la cadena de ADN codificamos dos números y la operación multiplicación, la proteína resultante sería diferente y contendría, codificado, el valor de la multiplicación de ambos números. El «procesador» de este biocomputador estaría formado por tubos de ensayo conectados a rápidos secuenciadores de proteínas que determinarían el resultado. En estos sistemas, la lógica y la programación matemática de secuencias serían idénticas a las que se emplean en circuitos electrónicos, pero usando señales de tipo bioquímico en lugar de señales eléctricas. Aunque se trata de una propuesta muy elegante, su implementación comercial presenta muchas dificultades,

y aún está lejos de ser conseguida. Estos sistemas serían relativamente lentos y de una compleja programación, pero la cantidad de operaciones que se podrían realizar en unos cuantos centímetros cúbicos de disolución sería gigantesca, y así se están realizando avances continuos en este terreno. Aunque la computación bioquímica parezca una apuesta demasiado radical y extraña, no debemos dejar de mencionarla ya que toda una rama de la nanotecnología se basa en el posible uso de cadenas programadas de ADN como elemento estructural para fabricar sistemas de mayor complejidad, como veremos más adelante.

Computación cuántica. Esta propuesta se ha desarrollado en los últimos veinte años y parte de la idea de abandonar las reglas que hasta ahora han cimentado la arquitectura de los computadores. En los microchips, la información fluye codificada mediante una secuencia binaria (de ceros y unos) y es procesada mediante «puertas lógico-aritméticas» que combinan resistencias, conectores, transistores, condensadores, etc. Estas puertas realizan operaciones con los bits siguiendo las leyes del álgebra establecidas por G. Boole en el siglo XIX. ¿Qué alternativa hay al uso de estas estrategias? Pues utilizar otras ideas basadas en la mecánica cuántica, lo que se conoce como «computación cuántica». Esta idea, que ya fue esbozada por R. Feynman, ha comenzado a tomar cuerpo en los últimos años. Los computadores cuánticos se basarían en un nuevo tipo de bit donde se almacena información: el bit cuántico, también conocido como «cubit» o *qubit*. Estos bits cuánticos presentan niveles de energía bien definidos (como los niveles en los átomos o los de los puntos cuánticos) en los que se puede almacenar información de manera simultánea usando el principio de superposición de la mecánica cuántica. Por ejemplo un bit clásico toma un valor 0 o 1, pero en mecánica cuántica podemos preparar un cubit consistente en una combinación en la que medir «0» tenga un 25% de probabilidad y la de medir «1» el 75% restante, por poner un ejemplo. De esa forma un cubit simultáneamente incluye información de las dos posibilidades. Un cubit, por tanto debe basarse en un sistema en el que existan niveles de energía bien definidos y desde el exterior podamos preparar estos niveles de una manera adecuada. Se han propuesto diversos sistemas como candidatos a cubits, algunos basados en sistemas de puntos cuánticos convenientemente litografiados sobre un circuito y otros en trampas de iones o de átomos. En cualquier caso la fabricación de estos cubits seguramente requerirá la intervención de herramientas propias de la nanotecnología.

Los cubits se pueden agrupar para aumentar la cantidad de información cuántica acumulada. Por ejemplo, en un registro formado por 5 bits clásicos podemos almacenar

sólo una de las $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$ combinaciones posibles. Sin embargo, los mismos bits en su versión cuántica (cubits) podrían almacenar simultáneamente las 32 combinaciones. Las posibilidades crecen y crecen a medida que se usan más y más cubits. Por ejemplo con 50 cubits, que podrían ocupar una cantidad irrisoria de espacio gracias a las técnicas de la nanotecnología, se podrían preparar un número de estados equivalente a unos 100 TBytes de información, lo que es similar a decenas de veces la capacidad de los discos duros más potentes que hoy podemos adquirir. Otra característica que tienen los cubits, en comparación con los bits convencionales, es su capacidad para entrelazarse cuánticamente. Dar detalles sobre este tema complejo requeriría una larga explicación, que queda fuera del contexto de este libro, pero hay que mencionar que esta capacidad está detrás del fascinante fenómeno de la teleportación cuántica.

La computación cuántica busca la construcción de un procesador capaz de trabajar en paralelo con todos los datos que simultáneamente están almacenados en los cubits. Dicho procesador cuántico utilizaría para su funcionamiento las reglas de la mecánica cuántica en cada una de las operaciones típicas que realiza un procesador: introducir y procesar la información, realizar correcciones de errores, leer y almacenar los resultados. El día que tengamos acceso a estas máquinas podremos realizar en pocos segundos operaciones que ahora requerirían miles de años en un procesador convencional. Uno de los científicos más importantes en este campo es el español J. I. Cirac, premio Príncipe de Asturias del año 2006, y galardonado a principios de 2013 con el prestigioso Premio Wolf, que algunos consideran la antesala del premio Nobel de Física.

Las revolucionarias propuestas que transformarán las TIC no sólo se limitarán a procesadores o memorias, sino que provocarán cambios igual de profundos en los sistemas del almacenamiento de datos, en los sistemas de interface entre el usuario y la máquina, y en los demás sistemas periféricos. En cuanto a los nuevos sistemas de almacenamiento de datos se están haciendo propuestas que van desde seguir disminuyendo el tamaño de los bits magnéticos hasta utilizar sistemas inspirados en los microscopios de fuerzas atómicas, sin olvidar la creciente importancia de los dispositivos de estado sólido. Estas estrategias nos permitirán tener *pendrives* o diminutos CDs con cientos y miles de veces más capacidad que los sistemas actuales. Pero tampoco se puede descartar llegar al «almacenamiento extremo» basado en la utilización de átomos individuales como bits, tal como se han demostrado recientemente investigadores de IBM, que han conseguido grabar y leer información en átomos aislados de hierro. La revolución será similar en cuanto al resto de dispositivos: la superficie de las pantallas planas seguirá creciendo tanto en tamaño como en densidad

de píxeles a la vez que su espesor continuará disminuyendo, y todas serán táctiles, flexibles, e incluso plegables. Los ratones y teclados seguramente irán desapareciendo y mejorarán increíblemente los sistemas de reconocimiento de voz y de traducción automática en tiempo real. Finalmente, los procesadores y memorias tendrán tamaños tan diminutos y arquitecturas tan distribuidas que formarán parte de la propia pantalla o de la carcasa del dispositivo. Todos estos desarrollos se harán realidad si simultáneamente van acompañados de una mejora tanto en su eficiencia energética como en los dispositivos de almacenamiento energético, temas en los que la nanotecnología también está proponiendo innumerables soluciones.

La espintrónica, los computadores fotónicos, la biocomputación, la computación cuántica, los nuevos materiales para fabricar pantallas ultradelgadas y flexibles o la utilización de átomos para el almacenamiento de datos son apuestas que se hacen desde la ciencia. Muchas de éstas se quedarán como propuestas arriesgadas que no tuvieron aplicación mientras que otras darán lugar a nuevas tecnologías que proporcionarán avances incrementales o rupturistas. Hay tanta variedad de propuestas que es extremadamente difícil imaginarse cuál de ellas será la que se convierta en la tecnología dominante y que decidirá, por ejemplo, qué tipo de dispositivo llevaremos dentro de una decena de años en nuestro bolsillo para comunicarnos (puede que el propio traje sea el dispositivo). Este ejercicio de predicción es tan complejo como hace treinta años lo fue predecir Internet, la telefonía móvil, el GPS, o que en un disco duro podríamos almacenar todas las canciones que escucharíamos a lo largo de nuestra vida. Además, es importante resaltar que la elección de las tecnologías predominantes no es un tema sencillo pues se entremezclan temas económicos y de percepción social. Por un lado, las soluciones que son extremadamente bellas para un científico no tienen por qué llegar a los escaparates si los costes de producción son muy grandes en comparación con otras tecnologías no tan avanzadas o sofisticadas. Por otro lado, los avances tecnológicos se incorporan con dificultad a nuestras vidas si intuimos o conocemos la existencia de ciertos riesgos tanto para nuestra salud como para el medioambiente.

Como curiosidad hay que mencionar que en el ámbito de las TIC su evolución puede quedar fuertemente condicionada por un fenómeno que todos hemos observado: a medida que aumentan las prestaciones de nuestro computador personal el sistema operativo y los programas que se usan también crecen en complejidad, de forma que el avance percibido es menor del esperable. Esta percepción se conoce como la Ley de N. Wirth, que afirma que el *software* se ralentiza más deprisa de lo que se acelera el *hardware*, por lo que cada día se necesita un ordenador más potente para hacer lo

mismo. Este ejemplo pone de manifiesto que otro factor clave para el desarrollo de las TIC es disponer de un sofisticado *software* que permitirá sacar provecho de la potencia de todos nuestros dispositivos.

5.9. Supercomputación y el ser humano «hiperrelacionado»

La ciencia y la tecnología tampoco han escapado de la influencia de las TIC y han entrado en una dinámica que podríamos describir como de «círculo virtuoso». La ciencia y la tecnología facilitan nuevos materiales y dispositivos que permiten la fabricación de equipos electrónicos y de cálculo más sofisticados con los que, por un lado, se diseñan componentes y circuitos integrados cada vez más complejos y, por otro, podemos profundizar en nuestra comprensión de la materia a escala nanométrica, lo que permite proponer nuevos materiales y dispositivos mucho más avanzados. Este círculo virtuoso es un acelerador del progreso en general y del conocimiento científico-técnico en particular.

Por tanto, el desarrollo de las TIC ha permitido poner a disposición de los científicos nuevas herramientas de computación que permiten abordar el estudio de la naturaleza desde una perspectiva completamente nueva. Las leyes de la mecánica cuántica son, por el momento, las que nos sirven para explicar el comportamiento de la materia, pero por lo general se plasman en ecuaciones, como la de Schrödinger, que son muy difíciles de resolver. En mecánica cuántica muy pocos problemas tienen una solución de tipo analítico (es decir basados en desarrollos matemáticos que se expresan mediante «lápiz y papel»). Por lo general, cuando el sistema que se pretende estudiar está formado por unos cuantos átomos o electrones la situación se hace inmanejable, por lo que se requieren ciertas simplificaciones y la entrada en escena de un aliado: el computador.

Las herramientas más potentes a las que tenemos acceso son los supercomputadores. Los países más desarrollados están continuamente instalando nuevos supercomputadores que utilizan decenas de miles de procesadores y permiten simular multitud de fenómenos de interés en todos los campos del saber. La página web www.top500.org presenta la clasificación de estas máquinas ordenadas por su capacidad de cálculo. A finales de 2013 el supercomputador más poderoso se encontraba en el Centro Nacional de Supercomputación de Guangzhou (China) y tiene como nombre «Tianhe-2». Este monstruo de la supercomputación tiene 3 120 000 núcleos de cálculo en procesadores Intel Xeon que le permiten alcanzar una velocidad de procesamiento de 33,8 Petaflops/s (PFlops/s), consumiendo 17 800 kW. Hay que

resaltar que un «Petaflop/s» equivale a mil billones (europeos) de operaciones de coma flotante por segundo. El segundo supercomputador más poderoso se encuentra en EE.UU., en el Laboratorio Nacional Oak Ridge perteneciente al Departamento de Energía, tiene como nombre «Titan» y ha sido desarrollado por la empresa Cray Computers. Este supercomputador posee más de medio millón de procesadores que le permiten alcanzar una velocidad de procesamiento de 17,6 PFlop/s, consumiendo 8200 kW. El tercer supercomputador más potente del mundo se denomina «Sequoia», ha sido fabricado por IBM y está instalado en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore del Departamento de Energía de los EE.UU. Este otro coloso de la computación posee más de 1,5 millones de núcleos de computación proporcionando una capacidad de cálculo de 16,3 PFlop/s. Para funcionar, este sistema consume 8000 kW. Un aspecto que hay que destacar es que en la carrera de los computadores se busca el mayor rendimiento con el menor consumo energético posible. Otro punto interesante es que dos de los tres supercomputadores más potentes del mundo están instalados en el Departamento de Energía de los EE.UU., lo que pone de manifiesto la importancia que los temas relacionados con la energía tienen en la investigación actual. Entre los veinte computadores más potentes, nueve están en EE.UU., siete están en Europa, dos en Japón y dos en China. Sin embargo, esta clasificación es extremadamente cambiante y lo más probable es que sea distinta cuando el lector lea estas líneas.

Lo que resulta sobrecogedor es la frenética carrera que se ha iniciado para tener acceso a estas máquinas. Lo cierto es que los cálculos que son capaces de abordar estos supercomputadores ayudan a gestionar muchas tareas administrativas (impuestos, censos, fichas sanitarias, etc.), optimizar el flujo de las comunicaciones, realizar predicciones meteorológicas, diseñar nuevos fármacos, automóviles, aviones o nuevos procesadores. Desde el punto de vista científico, estas máquinas son extremadamente útiles para simular el comportamiento de sistemas de gran complejidad, como por ejemplo, galaxias, huracanes, tsunamis, proteínas o para descifrar códigos genéticos. En el ámbito de la nanotecnología, estos supercomputadores, alimentados de sofisticados programas que se llevan desarrollando desde hace varias décadas, permiten estudiar las propiedades de los nanomateriales y de los procesos que tienen lugar en la nanoescala. Pensemos que un cubito de materia de un 10 nm de lado puede contener cientos de miles de átomos y que determinar cómo se mueven todos estos átomos o calcular todos los niveles de energía en los que colocar a los electrones de este diminuto sistema son unas tareas realmente épicas. Cuanto más potentes sean los computadores, más complicados sistemas podremos abordar y de esta forma entender qué propiedades eléctricas, magnéticas, mecánicas u ópticas tienen los diferentes nanobjetos que hemos ido presentando en este libro, para saber cómo utilizarlas en

nuestro provecho.

Supercomputadores y códigos de computación nos permiten entender cómo se enlazan los átomos y qué estructuras son más estables, cómo se transportan electrones en dispositivos realizados de nanotubos, moléculas o grafeno, la manera en la que los materiales se deforman o fracturan en presencia de tensiones, cómo se forma un nanotubo de carbono, cómo se emite luz desde un punto cuántico, cómo se deforma una proteína ante cambios en las condiciones ambientales, la forma en que se propaga la luz en un dispositivo fotónico, etc. Todas esas simulaciones arrojan datos que permiten completar o mejorar la visión que se obtiene del nanomundo a partir de los resultados experimentales. La información adquirida permite también predecir las hipotéticas propiedades de materiales avanzados que aún no existen y la forma en la que deben ser sintetizados. En algunos casos las ecuaciones de partida y las simulaciones son tan precisas que pueden sustituir parte de la actividad experimental, ahorrando muchos recursos y tiempo, y se dice que se realizan experimentos «in silico» (aludiendo al material de referencia de los procesadores). Sin embargo, por lo general, las simulaciones y los experimentos se complementan para proporcionar una visión global del sistema estudiado. Un ejemplo lo encontramos en un estudio publicado en 2012 que mostraba por primera vez los enlaces químicos dentro de una molécula utilizando microscopía AFM. La molécula estudiada era el hexabenzocoroneno ($C_{42}H_{18}$), una molécula plana que tiene parecido con un fragmento hexagonal de grafeno. El resultado experimental se acompañaba de una serie de cálculos de la estructura electrónica del sistema formado por la molécula y la punta del microscopio AFM que permitían corroborar que la imagen obtenida correspondía a la de dichos enlaces. Esta investigación se realizó gracias a la colaboración de tres grupos de investigación de Francia, Suiza y de la Universidad de Santiago de Compostela (España), lo que también pone de relieve el alto grado de colaboración que se da en el ámbito científico.

Sin duda, uno de los aspectos más apasionantes de este círculo virtuoso es que la simulación en la nanoescala nos permite entender y mejorar el funcionamiento de los componentes con los que posteriormente fabricaremos las futuras generaciones de computadores que, a su vez, nos permitirán hacer cálculos para llegar a tener otra generación de ordenadores más y más potentes. Aunque es cierto que muchos problemas aún son inabordables para los supercomputadores actuales, sabemos que tan sólo debemos esperar unos pocos años más para tener a mano procesadores con prestaciones mejoradas con los que poder digerir estos problemas. En la actualidad ya existen varios programas internacionales para poner en marcha, a lo largo de la próxima década, supercomputadores que alcancen el «Exaflop/s» de potencia de cálculo (un factor 1000 por encima del Petaflop/s). Parece que este círculo virtuoso va

a seguir dando vueltas a gran velocidad durante varias décadas.

Otra alternativa a los supercomputadores es utilizar el potencial de computación que hay oculto o desaprovechado en cientos de millones de computadores de pequeño o medio tamaño que están parados en oficinas y viviendas particulares durante las noches y los fines de semana. Este tipo de computación o computación en GRID (en red) es otra alternativa a los supercomputadores aunque tiene algunos inconvenientes asociados a la complejidad de gestión y a la posible falta de disponibilidad de recursos cuando son necesarios. Esta experiencia se ha utilizado en astrofísica de manera exitosa para realizar el análisis de datos de diferentes observaciones o para llevar a cabo simulaciones del comportamiento de galaxias o estrellas. Más recientemente se habla de «computación en la nube» (*Cloud computing*) refiriéndose al conjunto de servicios de cálculo, almacenamiento masivo, programas que llegan a un usuario final a través de Internet y en el que lo importante es que el sistema funcione sin que el usuario sepa dónde se encuentran los procesadores, memorias, discos duros, etc. Los grandes supercomputadores, la computación distribuida en una red o los servicios en la nube son también empleados por las empresas. Pensemos en la rápida respuesta que proporciona un buscador de información de Internet cuando es utilizado por millones de usuarios conectados simultáneamente solicitándole millones de peticiones diferentes. Estos sistemas distribuidos, sobre los que se asientan servicios públicos y multitud de negocios, van dando soporte al desarrollo de una inteligencia colectiva de la humanidad y permitirán que la revolución que hace unos años se inició de la mano de Internet siga ahora adelante de la mano de nuevas generaciones de seres humanos hiperconectados.

— 6 —

NANOQUÍMICA: EL PUZLE DE LAS MOLÉCULAS

—¡Joven! ¡Joven! —exclamó apesadumbrado el monje— ¿por qué deseas con tanto ahínco encontrar compañía? ¿Por qué les atraerá tanto la vida mundana a los electrones? Sin embargo, si insistes en tener compañía, te ayudaré a satisfacer tu deseo. Si miras en la dirección a la que estoy apuntando, verás a un átomo de cloro que se está acercando a nosotros e, inclusive, a esta distancia, puedes ver un espacio sin ocupar en el que serás muy bien recibido. El lugar vacío se halla en el grupo exterior de los electrones, la llamada envoltura o nivel electrónico M. Cuando los dos átomos estén muy cerca el uno del otro, no tienes más que saltar, como lo suelen hacer los electrones de valencia. ¡Y que mi paz sea contigo, hijo mío!

Al decir estas palabras, la impresionante figura del sacerdote electrón se desvaneció repentinamente en el aire. Sintiendo mucho más reconfortado, el señor Tompkins reunió sus fuerzas para dar un salto mortal en la órbita del átomo de cloro que pasaba. Para su sorpresa, pudo dar el salto grácilmente y se encontró en el acogedor ambiente de los miembros de la envoltura M del cloro.

—¿Por qué no se va ese átomo que acabas de dejar? —le preguntó su compañero frunciendo el ceño—. ¿Esperará que regreses? —Y, en efecto, el átomo de sodio, que había perdido su electrón de valencia, se apretaba contra el de cloro como si esperara que el señor Tompkins cambiara de parecer y saltara de nuevo a su órbita solitaria.

—Vaya, ¿qué te parece? —le preguntó enfadado el señor Tompkins, haciéndole una mueca al átomo que poco antes le había recibido con tanta frialdad—. Ése ni come, ni deja comer.

—¡Bah!, éstos siempre hacen lo mismo —intervino un miembro más experimentado de la envoltura M—. Durante el tiempo que permanezcas aquí nuestro átomo no será ya neutral, sino que tendrá una carga electrónica adicional. Por eso el átomo de sodio sigue ahí, detenido por la fuerza de la atracción eléctrica. Le oí decir cierta vez al padre Paulini que esas comunidades atómicas, a las que les sobra o les falta un electrón, son llamadas iones positivos y negativos.

GEORGE GAMOW, *La investigación del átomo*, 1939

6.1. Química y nanotecnología

En los capítulos anteriores, y fundamentalmente en el dedicado a nanomateriales, ha

quedado patente que para lograr avances importantes en nanociencia y nanotecnología es necesario ser capaz de obtener y manipular de manera controlada entidades de tamaño nanométrico. Y para que nos ayude a lograr este objetivo, nada mejor que recurrir a una ciencia que todos conocemos bien, la química.

Hoy en día es habitual escuchar en diferentes foros que todo lo que nos rodea en nuestra vida cotidiana es química. Esta afirmación, que habremos oído en numerosas ocasiones, es una consecuencia de la definición de química que podemos encontrar en cualquier libro de texto: «ciencia que estudia la estructura, propiedades y transformaciones de la materia a partir de su composición atómica». Y puesto que en nuestro día a día todo lo que tocamos, vemos, olemos o saboreamos está relacionado con compuestos químicos (y éstos a su vez se encuentran formados por átomos), no cabe duda de que nos encontramos rodeados de «química». Tanto es así que independientemente de cuál sea nuestra formación en esta disciplina, todos somos conscientes de cómo sus múltiples aportaciones a lo largo de la historia han permitido mejorar considerablemente el bienestar general de la sociedad. Un reflejo de ello fue la declaración, por parte de la Unesco, del año 2011 como «Año Internacional de la Química», cuya celebración incluyó numerosos actos en todo el mundo que pretendían poner de manifiesto su gran relevancia en nuestras vidas.

Entre otras cosas, la química nos enseña cómo partiendo de unidades elementales (los átomos) se construye el mundo circundante. Así, las moléculas de agua con las que nos lavamos la cara cada mañana provienen de la combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, o la cafeína que consigue despertarnos a diario está formada por ocho átomos de carbono, diez de hidrógeno, cuatro de nitrógeno y dos de oxígeno. Como nos demuestran los sueños del señor Tompkins, cualquiera de nosotros estamos en mayor o menor medida familiarizados con la forma en que a partir de diferentes átomos se originan las moléculas que conforman nuestro entorno. Así sabemos, por ejemplo, que en los enlaces que dan lugar a la formación de un compuesto químico están involucrados los electrones más externos de los átomos que lo forman, y que dependiendo de cuál sea su estructura electrónica, cada átomo se enlazará de una manera u otra a sus vecinos, resultando diferentes tipos de fuerzas de cohesión, gracias a las cuales se mantienen unidos.

Pues bien, en el presente capítulo se pretende ir «más allá» y ver, por ejemplo, cómo esas moléculas formadas por agrupaciones de átomos son capaces de unirse entre sí generando estructuras de mayor tamaño, objetos nanométricos que harían las delicias oníricas del señor Tompkins. En definitiva, se trata de profundizar en las aproximaciones, estrategias o herramientas pertenecientes al mundo de la química que van a permitir desarrollar estructuras de tamaño nanométrico con propiedades útiles

para la nanotecnología.

Como ya comentamos en el Capítulo 2, las estrategias de síntesis que se utilizan en nanotecnología están basadas en procedimientos de ensamblado de tipo ascendente, lo que significa que utilizando unidades de construcción básicas (átomos o moléculas) se pueden crear estructuras superiores de tamaño nanométrico. Pero, ¿cómo lograr la unión de estas unidades elementales para obtener estructuras con diferente grado de complejidad?

En el laboratorio, la construcción de dispositivos moleculares implica términos como «reconocimiento molecular», «autoensamblado» o «química supramolecular». Este último concepto, en palabras del científico francés J. M. Lehn podría definirse como la química «más allá de la molécula». Así, si la química molecular se encarga del estudio de las moléculas, es decir, de las estructuras que se obtienen al combinarse los átomos entre sí, la química supramolecular va un poco más lejos, encargándose de estudiar cómo las moléculas interaccionan entre ellas dando lugar a estructuras superiores. Para explicar esto, J. M. Lehn recurre al siguiente símil: si las moléculas fuesen personas, la química molecular trataría de personas y la química supramolecular de la sociedad.

6.2. La química supramolecular

Este relativamente nuevo campo de conocimiento se encarga de estudiar la química que permite la unión de moléculas entre sí, originando entidades moleculares denominadas supramoléculas. En la construcción de una supramolécula a partir de sus constituyentes moleculares se ven involucrados diferentes tipos de fuerzas y todas tienen en común el hecho de presentar una menor fortaleza que la que le corresponde a un enlace covalente. Un ejemplo sencillo nos permite clarificar en qué consiste un enlace covalente y en qué se diferencia de otros tipos de enlace que se producen típicamente entre moléculas, como el enlace de hidrógeno. Para ello, vamos a fijarnos en uno de los compuestos químicos más familiares para nosotros: el agua. En una molécula de agua (H_2O), los enlaces que mantienen unidos a los dos átomos de hidrógeno con el átomo de oxígeno son de tipo covalente y consisten en la compartición de electrones. Estos enlaces son fuertes, y por tanto no es fácil, una vez formada la molécula, conseguir romperla y separar sus átomos constituyentes. A su vez, las diferentes moléculas de agua se mantienen unidas entre sí mediante un tipo de fuerzas intermoleculares, denominadas enlaces de hidrógeno, que consisten en atracciones electrostáticas entre el hidrógeno de

una molécula y el oxígeno de la molécula contigua. Aunque estas fuerzas son lo suficientemente fuertes como para conseguir que las moléculas estén unidas, permitiendo que el agua sea líquida a temperatura ambiente, son mucho más débiles que las que mantienen a los átomos de H y O unidos entre sí para formar la molécula.

Puesto que las interacciones que controlan la química supramolecular son interacciones no covalentes, las entidades supramoleculares no son, en general, tan estables como los sistemas covalentes. A pesar de que en un principio esto pudiese parecer una desventaja, en realidad es una propiedad básica de la química supramolecular a la que se le puede sacar mucho provecho pues las interacciones que resultan son típicamente dinámicas y reversibles, siendo esto de gran utilidad para numerosas aplicaciones nanotecnológicas.

Los procesos de autoorganización y autoensamblado de «unidades básicas» o «bloques de construcción» conducen a la formación de agregados supramoleculares superiores. El procedimiento que puede seguirse consiste en comenzar sintetizando las «unidades básicas» que formarán la supramolécula haciendo uso de los métodos tradicionales de síntesis química, para después ponerlas en contacto en las condiciones adecuadas de forma que se vayan uniendo entre sí de una manera concreta, gracias a un proceso de reconocimiento molecular. Como ya hemos mencionado, las interacciones no covalentes que se establecen entre las unidades básicas que forman una supramolécula pueden ser de diversos tipos (por ejemplo, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, interacciones electrostáticas, fuerzas hidrófobas o enlaces de coordinación).

Un ejemplo de autoensamblado perteneciente al mundo de la biología que todos conocemos es el que se produce cuando una cadena sencilla de ácido desoxirribonucleico (ADN) reconoce a su hebra complementaria. Ambas cadenas quedan unidas entre sí mediante interacciones no covalentes (concretamente mediante enlaces de hidrógeno) entre sus bases nitrogenadas: adenina (A) con timina (T) y guanina (G) con citosina (C). Como se verá más detalladamente en el Capítulo 7, cada una de las cadenas de ácido nucleico, se ha formado a partir de la unión de unidades básicas, denominadas nucleótidos. En la naturaleza, este tipo de mecanismos lleva millones de años funcionando y ha permitido que, a partir de una serie de unidades básicas constituyentes (aminoácidos, ácidos grasos, monosacáridos, nucleótidos), se originen estructuras mucho más complejas (proteínas, lípidos, polisacáridos, ácidos nucleicos), lo que ha dado lugar al desarrollo de los seres vivos.

La síntesis en el laboratorio de compuestos que participan en la formación de supramoléculas ha suscitado un enorme interés, y se han obtenido estructuras muy diversas que han sido bautizadas con nombres tan extravagantes como «criptandos»,

«esferandos», «cavitandos», «cucurbituriles» o «ciclodextrinas». El componente de creatividad no se encuentra asociado únicamente a los nombres con que se designan estos compuestos, sino que es una característica primordial de su síntesis. Si se conocen las propiedades de las moléculas que van a formar una entidad supramolecular y, por tanto, qué tipo de interacciones pueden establecerse entre ellas, se abre la posibilidad de realizar un diseño controlado que conduzca a la formación de supramoléculas útiles para fines tecnológicos. Por ejemplo, para el desarrollo de compuestos farmacéuticos más eficaces. Dado que el funcionamiento de éstos se basa en su interacción con una diana biológica, la síntesis de nuevas nanoestructuras que fuesen adecuadas para llevar a cabo ese reconocimiento molecular de una manera más selectiva sería fundamental. Asimismo, la química supramolecular es la base de muchas otras aplicaciones como las relacionadas con la fabricación de sensores o con el diseño de materiales más respetuosos con el medioambiente.

Debido a todo ello, y como ya se ha comentado, el diseño de estructuras supramoleculares que puedan tener aplicaciones tecnológicas concretas es una línea de investigación seguida por diversos laboratorios en todo el mundo, lo que ha originado que su número no haga más que crecer. De entre todas ellas, a continuación se presentarán algunos ejemplos como las supramoléculas basadas en «éteres corona» (que son importantes desde un punto de vista histórico pues se encuentran entre las primeras desarrolladas), las basadas en «dendrimeros» (que presentan unas variadas e interesantes aplicaciones en diversos campos), las basadas en «metalociclos» (en los que se pone en evidencia la importancia de los enlaces de coordinación para generar este tipo de estructuras) o los «rotaxanos» (que nos permitirán introducir el concepto de motor molecular). A través de estos ejemplos quedará patente la capacidad de la química para lograr diseñar estas supramoléculas «a la carta», es decir, de manera que tengan una estructura y unas propiedades determinadas según la función a la que vayan a destinarse.

Los éteres corona y los iones alcalinos: cabeza y corona de un rey. En los orígenes de la química supramolecular se encuentran los trabajos del científico estadounidense C. J. Pedersen, quien describió la síntesis, estructura y propiedades de una serie de compuestos que denominó éteres corona. Éstos son estructuras que presentan una cavidad en el centro y son capaces de reconocer iones alcalinos, pudiendo, por tanto, unirse a ellos. Dado que los diferentes iones alcalinos poseen diferente radio iónico, cada uno de ellos va a encajar preferentemente en un éter-corona: aquél cuyo hueco central sea más parecido al tamaño del ión. La supramolécula resultante de la

interacción huésped-anfitrión (*host-guest*) entre un ión alcalino y un éter corona puede verse representada en la Figura 6.1. El ión se mantiene en la cavidad gracias a las interacciones electrostáticas que se producen entre su carga positiva y los dipolos negativos debidos a los átomos de oxígeno del anillo.

La denominación de estos compuestos como éteres corona se debió también a C. J. Pedersen, en un intento de simplificar la nomenclatura existente que, como él mismo reconocía, era difícil incluso de recordar. La nueva denominación tenía en cuenta el número de átomos de oxígeno en el anillo, así como el propio tamaño de éste. Así por ejemplo, uno de los éteres corona más conocidos (Figura 6.1) pasó de denominarse «1, 4, 7, 10, 13, 16-hexaoxaciclooctadecano» a ser conocido como «éter 18-corona-6». Esta denominación no sólo es más sencilla de recordar pues indica que el anillo tiene 18 átomos, seis de los cuales son oxígeno, sino también más gráfica, pues la estructura de estos compuestos recuerda a la corona de un rey vista desde arriba.

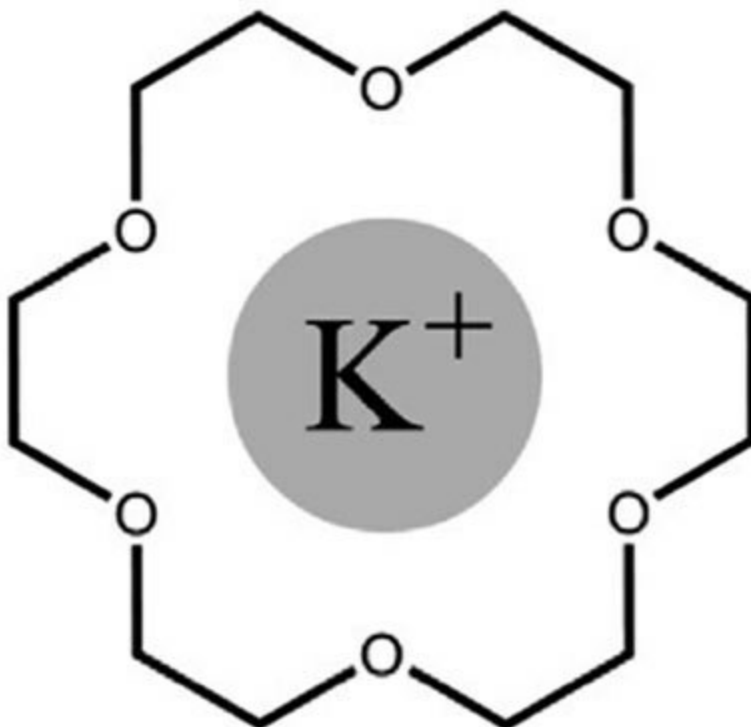


FIGURA 6.1. Supramolécula formada por el éter-corona denominado 18-corona-6 y un ion alcalino (potasio, K^+).

El trabajo de C. J. Pedersen representó un gran avance en el momento en que fue publicado pues abrió nuevas posibilidades. Había logrado sintetizar una serie de compuestos capaces de reconocer de manera selectiva iones que presentaban igual carga pero que se diferenciaban en el tamaño. Es decir, había logrado llevar a cabo una tarea de la que tradicionalmente se encargaba la biología y no la química: el reconocimiento molecular. Tras la obtención de los éteres-corona, se sintetizaron

multitud de compuestos supramoleculares con diferentes tamaños y formas, pero con la misma filosofía: ser capaces de reconocer iones o moléculas y hacerlo cada vez de manera más selectiva (por ejemplo, sintetizando compuestos en los que la cavidad central no fuese 2D, sino 3D). Aunque los primeros trabajos que se realizaron en Química supramolecular generaron escepticismo, debido a que parecía que usurpaban las labores típicas de la biología, no pasó mucho tiempo antes de que esta disciplina empezase a ser aceptada. De hecho, C. J. Pedersen junto con J. M. Lehn (del que ya hemos hablado anteriormente) y D. J. Cram recibieron el Premio Nobel de Química en 1987 por sus trabajos en este campo, en concreto por «el desarrollo y utilización de moléculas con interacciones de alta selectividad basadas en su estructura».

Los dendrímeros: esas estructuras arborescentes capaces de transportar moléculas. Otro ejemplo de estructura huésped-anfitrión es la que puede producirse entre los dendrímeros (que como veremos a continuación son un tipo de macromoléculas estructuralmente controladas que presentan cavidades en su interior) y diferentes moléculas.

El término dendrímero, que proviene del griego «dendros» que significa árbol, designa a ciertos compuestos macromoleculares que presentan una estructura ramificada. Como ejemplo, en la Figura 6.2.A se muestra la estructura de un dendrímero denominado PAMAM (poliamidoamina), donde pueden diferenciarse claramente tres partes: un núcleo situado en el centro de la estructura, una zona intermedia formada por unidades que se repiten (monómeros) y la zona exterior que presenta una serie de grupos químicos o funcionales. Es patente la similitud del conjunto con la copa del árbol que puede verse en la Figura 6.2.B.

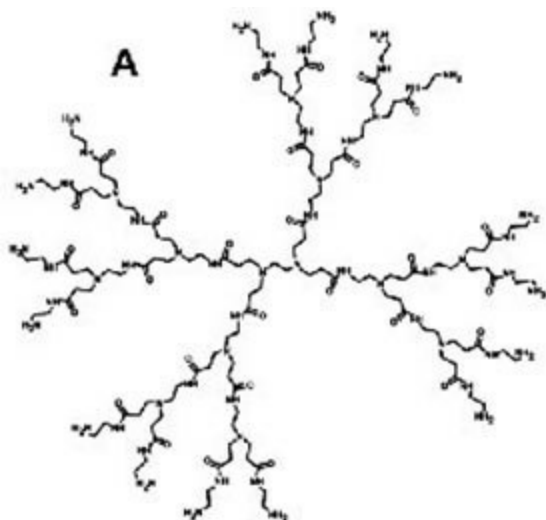


FIGURA 6.2. A) Estructura del dendrímero PAMAM (adaptado de la web de Dendritech <http://www.dendritech.com>), B) Sombra de un árbol que ilustra su estructura ramificada.

Como puede observarse, las unidades monoméricas que parten desde el núcleo poseen centros de ramificación o nodos en su extremo. Cada nodo permite la incorporación de nuevas unidades repetitivas, dando lugar a estructuras que cada vez van teniendo más «capas» o «generaciones». La repetición de este paso conduce, por tanto, al crecimiento de la estructura. El dendrímero resultante se caracteriza por el número de capas que aparecen desde el núcleo hasta su periferia y por el número y tipo de grupos funcionales que presentan en su superficie (en el caso concreto de la Figura 6.2.A son grupos amino: $-NH_2$). Aunque durante los últimos treinta años se han sintetizado una gran variedad de dendrímeros, únicamente están comercializados unos pocos, entre otros motivos, por su precio elevado.

Si se controla de forma exhaustiva el proceso de síntesis es posible modular las propiedades que presentarán las macromoléculas resultantes. Así, variando el número de generaciones se logra controlar tanto el tamaño como el número de grupos funcionales en la superficie. En la Tabla 6.1, donde se recogen estos dos parámetros para diferentes generaciones del dendrímero PAMAM, puede observarse cómo, a medida que va aumentando la generación, aumenta el diámetro y se duplica el número de grupos funcionales en la periferia, siendo éstos 1024 para el dendrímero de generación 8.

<i>Generación</i>	<i>N.º de grupos</i>	<i>Diámetro (nm)</i>
0	4	1.5
1	8	2.2
2	16	2.9
3	32	3.6
4	64	4.5
5	128	5.4
6	256	6.7
7	512	8.1
8	1024	9.7

TABLA 6.1. Características (número de grupos en la superficie y diámetro) de diferentes generaciones del dendrímero PAMAM (adaptado de la web de Dendritech <http://www.dendritech.com>)

No hay que olvidar que a medida que aumenta el tamaño de la estructura también aumenta la probabilidad de que se produzcan defectos en el crecimiento, pues puede darse el caso de que algunos grupos no reaccionen. Por otro lado, la naturaleza de las moléculas que se elijan como núcleo, como monómero ramificado y como portadoras de los grupos funcionales externos también va a influir en las características finales del

dendrúmero resultante. Así, según sea la longitud y el grado de ramificación del monómero se obtendrán estructuras más o menos densas; y dependiendo de cuáles sean los grupos funcionales expuestos, por ejemplo un amino ($-\text{NH}_2$), un carboxilo ($-\text{COOH}$) o un hidroxilo ($-\text{OH}$), se puede controlar y modificar a voluntad sus propiedades y su reactividad.

La síntesis de un determinado dendrúmero puede, por tanto, realizarse a la carta, controlando nanómetro a nanómetro la arquitectura del compuesto que se desea generar, así como sus propiedades finales (en términos de tamaño, reactividad, solubilidad o flexibilidad). Como consecuencia, este tipo de estructuras da lugar a aplicaciones muy versátiles, y se ha logrado sintetizar dendrúmeros electro y fotoactivos u otros que presentan una gran aplicación en procesos catalíticos o en biomedicina.

Las aplicaciones de los dendrúmeros se basan en el gran potencial que presentan para interaccionar con otras moléculas, pues no sólo pueden hacerlo a través de los muchos sitios reactivos que se encuentran en su superficie, sino también utilizando las cavidades presentes en su interior. Así por ejemplo, la incorporación de fragmentos metálicos a dendrúmeros ha encontrado una gran aplicación en catálisis pues en la estructura resultante, denominada metalodendrúmero, las posiciones activas del catalizador son muy accesibles para las moléculas de reactivo. Además, debido a su tamaño, una vez finalizado el proceso es muy fácil separarlos por centrifugación de los productos de reacción. En este tipo de aplicaciones, cuando el anclaje del catalizador al soporte dendrítico es no covalente, la naturaleza reversible de la unión ofrece grandes ventajas, tales como poder cambiar de catalizador durante el proceso, lo que es de gran utilidad para reacciones en cascada.

Los dendrúmeros también presentan una gran aplicación en el transporte y posterior liberación de fármacos, los cuales, de nuevo, pueden unirse a los grupos funcionales externos o ser encapsulados en el interior del dendrúmero donde permanecerán anclados por la acción de diversas fuerzas no covalentes. Así se han sintetizado dendrúmeros capaces de transportar antiinflamatorios como el ibuprofeno, analgésicos como el ácido acetilsalicílico, o medicamentos para el tratamiento del cáncer como el metotrexato o la adriamicina. En todos estos casos es fundamental controlar tanto el mecanismo como la velocidad de liberación de los fármacos en el cuerpo humano (es decir, su farmacocinética), con el fin de prolongar y distribuir mejor su efecto a lo largo del tiempo. El mecanismo de liberación debe ser lo más sencillo posible, pudiendo obedecer por ejemplo a un cambio de acidez, o a encontrarse la estructura dendrúmero-molécula en presencia de algún compuesto que logre romper la interacción entre ambos. A su vez, numerosas investigaciones van encaminadas a intentar dirigir el dendrúmero portador del fármaco hacia las células tumorales. Una forma de lograrlo consiste en

sintetizar un dendrímero que deje expuesto hacia el exterior ácido fólico (la vitamina B9), que es una sustancia captada por las células en general, aunque en mayor medida por aquellas que son tumorales. Asimismo, pueden ser utilizados como agentes antivirales. En este caso es necesario sintetizar un dendrímero cuya superficie mimetice la superficie celular que va a unirse al virus, de manera que dendrímero y célula diana compitan por el virus, provocando una menor infección de las células.

Ejemplos de dendrímeros comerciales con utilidad como nanofármacos o agentes de diagnóstico de diversas enfermedades son los sintetizados por la empresa Starpharma o por los Centros de investigación de la Armada de EE.UU. (US Army Research), que han desarrollado un gel (llamado *VivaGel*) basado en dendrímeros de polisina para prevenir la transmisión del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) o dendrímeros para la detección de ántrax (denominado *Ticket Alert*), respectivamente.

Todas estas posibles aplicaciones explican el indiscutible interés que en los últimos años han despertado los dendrímeros, los cuales además ofrecen la ventaja de ser, en general, fácilmente biodegradables. En el caso de aplicaciones biomédicas como las comentadas, es necesario tener en cuenta que el dendrímero sintetizado debe cumplir una serie de requisitos como poder atravesar barreras biológicas, ser estable durante el tiempo suficiente para ejercer el efecto clínico deseado y, por supuesto, no ser «citotóxico». En general, la citotoxicidad (es decir, la capacidad para desestabilizar la membrana celular induciendo la ruptura o lisis celular) depende del tipo de grupos funcionales que se encuentren en su superficie, de la naturaleza química del esqueleto dendrimérico y de la generación (siendo los de mayor generación más tóxicos). Todo ello, debe ser, por tanto, tenido en cuenta y controlado cuidadosamente.

Metalociclos: jugando a crear figuras geométricas. La utilización de los denominados enlaces de coordinación para crear agregados supramoleculares ha supuesto un gran avance, abriendo la posibilidad de diseño de nuevas estructuras. Este tipo de enlace también presenta una menor fortaleza que el covalente, cumpliendo con la propiedad que caracteriza a las fuerzas típicamente involucradas en Química supramolecular.

Un ejemplo de agregados supramoleculares donde las fuerzas involucradas son de este tipo son los denominados «metalociclos» que, como puede verse en la Figura 6.3, son estructuras cíclicas que contienen varios metales y presentan geometrías bien definidas. Se forman por unión entre iones metálicos y moléculas denominadas ligandos que presentan varias posiciones de coordinación (es decir, sitios por los que pueden dar lugar a un enlace). Puesto que las posiciones de coordinación se pueden encontrar

situadas a distintos ángulos de enlace, es posible originar una gran variedad de nuevas moléculas con formas regulares y tamaños nanométricos (de 1 nm a 1 μ m).

En la Figura 6.3 se muestra la formación de un agregado cuadrado por coordinación entre dos tipos de «subunidades» que presentan una disposición angular y lineal, respectivamente. En concreto puede verse cómo un compuesto que contiene paladio, con dos posiciones de enlace que forman entre sí un ángulo de 90° , y un segundo compuesto, con dos posiciones de enlace situadas entre sí a 180° , dan lugar a la formación de un cuadrado molecular.

Dependiendo de las unidades básicas de partida que se utilicen, es posible sintetizar un gran número de metalociclos diferentes. Así, por ejemplo, cuando se produce la interacción de un mayor número de subunidades, teniendo algunas de ellas al menos tres centros reactivos no planares, es posible desarrollar poliedros tridimensionales, por ejemplo, un nanocubo.

Siguiendo la idea expuesta, otra interesante posibilidad es sintetizar polímeros de coordinación, es decir, entidades que ya no sean discretas como en los casos anteriores sino de longitud tan larga como se desee. El ejemplo más sencillo sería la creación de cadenas poliméricas monodimensionales por unión de unidades lineales.

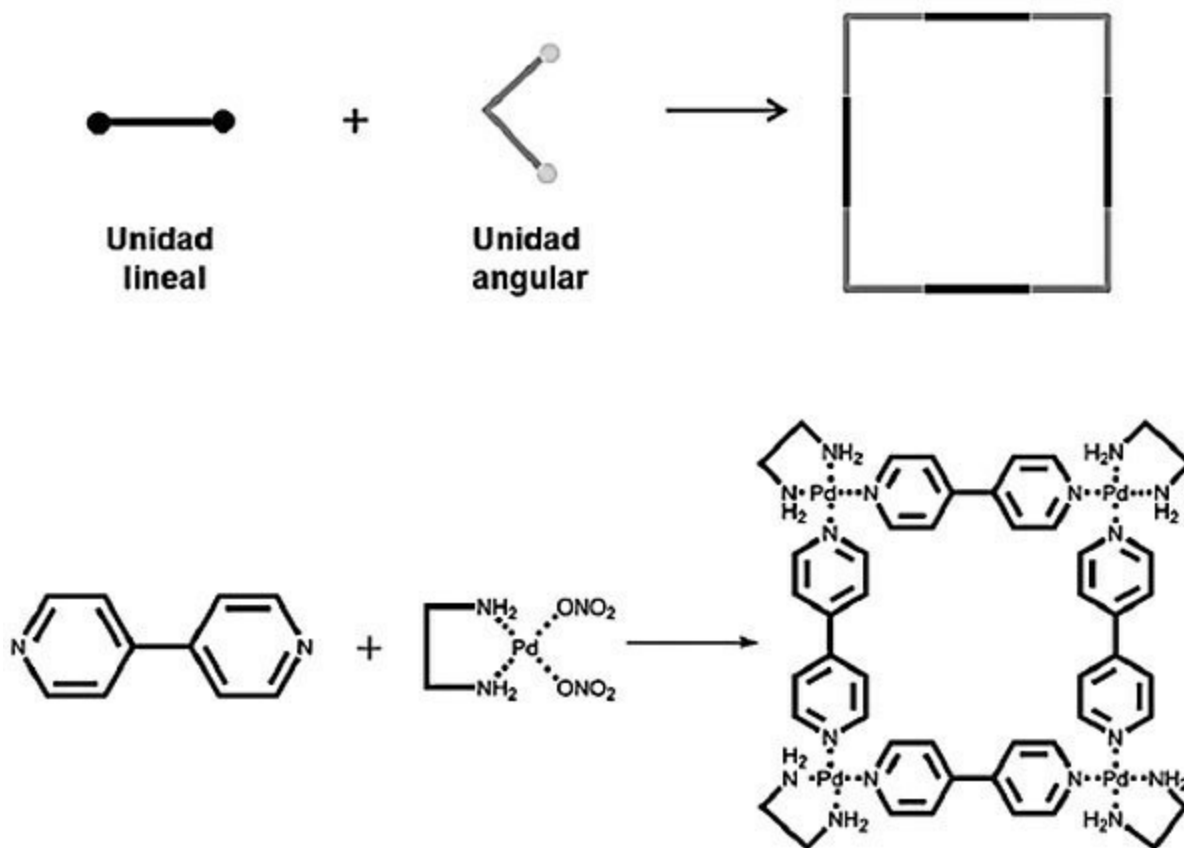


FIGURA 6.3. Formación de un metalociclo cuadrado. En el esquema superior, las posiciones de enlace presentes en las subunidades lineal y angular están representadas por bolas negras y grises, respectivamente.

Algunas de las aplicaciones de los metalociclos descritos están relacionadas con la existencia en su estructura de cavidades definidas en forma y tamaño, las cuales, como ocurría en el caso de los dendrímeros, permiten albergar diferentes moléculas en su interior. Además muchas de estas estructuras pueden actuar como catalizadores de diversos procesos.

Rotaxanos: los movimientos de vaivén controlados a voluntad. Por último, en la Figura 6.4 se muestra otro ejemplo de entidad supramolecular, que ya había sido mencionada en el Capítulo 5 pues, debido a sus particulares características, es una posible candidata para la fabricación de interruptores moleculares. Esta entidad, denominada rotaxano, se encuentra constituida por una molécula lineal que es «abrazada» por un compuesto cíclico. Para que el compuesto cíclico no se salga de la molécula lineal, esta última debe poseer grupos voluminosos en sus extremos.

Existen muchos rotaxanos distintos dependiendo de cuál sea la molécula lineal y cuál la cíclica. En la figura se puede ver un ejemplo concreto en el cual ambas moléculas permanecen unidas por interacciones electrostáticas: la molécula cíclica tiene carga positiva y se sitúa sobre la zona de la molécula lineal más rica en electrones. Sin embargo, si por aplicación de un estímulo externo adecuado se lograra que esa zona de la molécula lineal se cargase positivamente, la estructura cíclica se desplazaría sobre la molécula lineal hasta situarse en una zona distinta. De esta manera, dependiendo de si se aplica o no el estímulo, la molécula cíclica puede encontrarse sobre una u otra zona de la molécula lineal, originándose un movimiento de vaivén controlable a voluntad. De esta forma, cada posición puede corresponder a un valor (0, 1) de un bit, tal como se sugirió en el capítulo anterior.

A veces, por tanto, es posible transformar la estructura de una especie supramolecular por acción de un estímulo externo (por ejemplo, electricidad, luz, cambio de pH), y como consecuencia generar un movimiento traslacional o rotacional. Este tipo de dispositivos, denominados motores moleculares, pueden, al igual que sus equivalentes macroscópicos, dar lugar a diferentes tipos de movimientos mecánicos y, por tanto, es posible utilizarlos para una amplia gama de novedosas e interesantes aplicaciones nanotecnológicas.

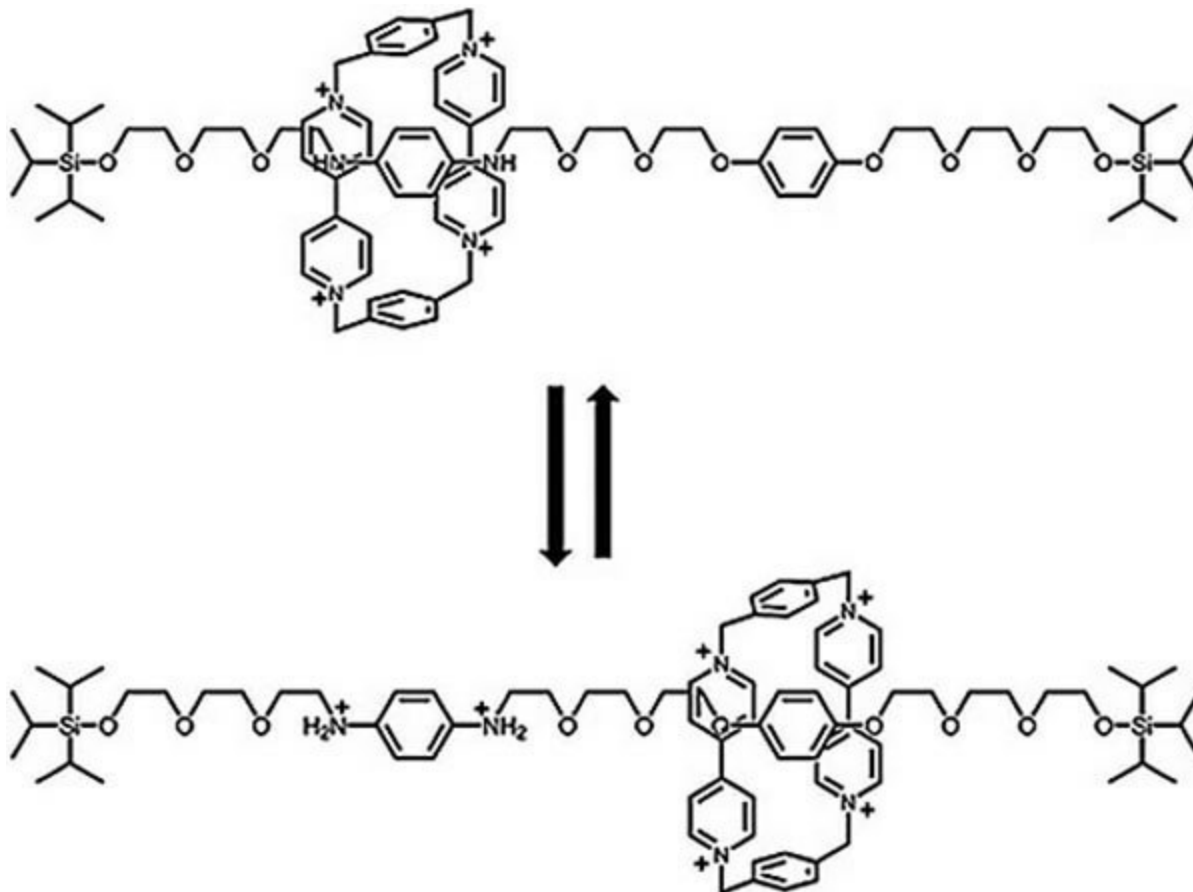


FIGURA 6.4. Ejemplo de la estructura de un rotaxano y de su respuesta ante un estímulo externo.

Como se adelantaba en el Capítulo 2, esta idea ya fue vislumbrada en 1986 por E. Drexler, quien en su libro *Engines of Creation* contempló la posibilidad de que en un futuro no muy lejano fuese posible construir motores moleculares basados en un engranaje de moléculas, donde unas hacen moverse a otras generando un movimiento mecánico. En el caso de E. Drexler, sin embargo, la propuesta para llegar a obtener estos engranajes de moléculas era absolutamente diferente a la mostrada en el presente capítulo, pues estaba basada en la utilización de los denominados «ensambladores». Estos ensambladores actuarían como dispositivos de montaje capaces de tomar y colocar las unidades básicas de construcción en unas posiciones concretas, de forma muy similar a los brazos robotizados que se usan para fabricar automóviles, pero a una escala muy inferior. Estos dispositivos serían, en principio, capaces de generar cualquier estructura que fuese compatible con las leyes de la física y la química e incluso de autorreplicarse a sí mismos. Como ya hemos comentado anteriormente, aunque ambas aproximaciones dieron lugar a un amplio debate entre importantes científicos que defendían o rebatían estas ideas, actualmente la mayoría de los puntos de vista se identifican con el enfoque proveniente del mundo de la química.

En la Figura 6.5 se muestra un ejemplo de las sorprendentes estructuras que pueden

generarse jugando con moléculas en un laboratorio, en concreto un coche de tamaño molecular sintetizado por J. Tour y otros investigadores de la Universidad de Rice (EE.UU.). En esta máquina molecular, a la molécula que constituye el chasis se encuentran unidos cuatro fullerenos que hacen las veces de ruedas, dando lugar a una estructura similar a un coche, pero con unas dimensiones de $3.3 \text{ nm} \times 2.1 \text{ nm}$. Al visualizar con microscopía de efecto túnel (STM) la molécula depositada sobre una superficie de oro, destacan claramente los cuatro fullerenos (que están recuadrados en la Figura 6.5 B,C,D,E), pudiéndose advertir en las imágenes secuenciales cómo un aumento de temperatura provoca un desplazamiento de los mismos sobre la superficie. Se puede observar en la figura cómo las moléculas de fullereno pueden rotar como si fuesen ruedas reales. Para lograr un desplazamiento efectivo las cuatro ruedas deben girar de la misma manera. En caso contrario, el nanocoche no se desplazaría o, como mucho, daría vueltas, enloquecido, sobre sí mismo.

Una vez más, estos motores moleculares encuentran análogos en la naturaleza. Así, por ejemplo, muchas proteínas del interior celular funcionan como auténticos motores utilizando la energía derivada del metabolismo para realizar diversas funciones como desplazarse, transportar otras moléculas o ejercer fuerzas sobre el entorno. En la Figura 6.6. se encuentra representada una proteína, la kinesina, capaz de transportar moléculas, orgánulos celulares o vesículas de un lugar a otro del medio intracelular al desplazarse sobre fibras del citoesqueleto (en concreto, los microtúbulos que constituyen el armazón estructural de las células eucariotas). Este desplazamiento es posible gracias a que se producen cambios en su estructura (provocados por la hidrólisis del trifosfato de adenosina, ATP, que sería algo así como la gasolina que hace funcionar el motor) de manera que se generan dos estados distintos con alta o baja afinidad por el microtúbulo, que se traducen en pasos discretos. De esta forma, mientras nosotros leemos este párrafo, en nuestro organismo la kinesina se encuentra «caminando» sobre las fibras del citoesqueleto de nuestras células dando pasos de unos 10 nm y transportando una «carga» que es muy superior a su propio peso.

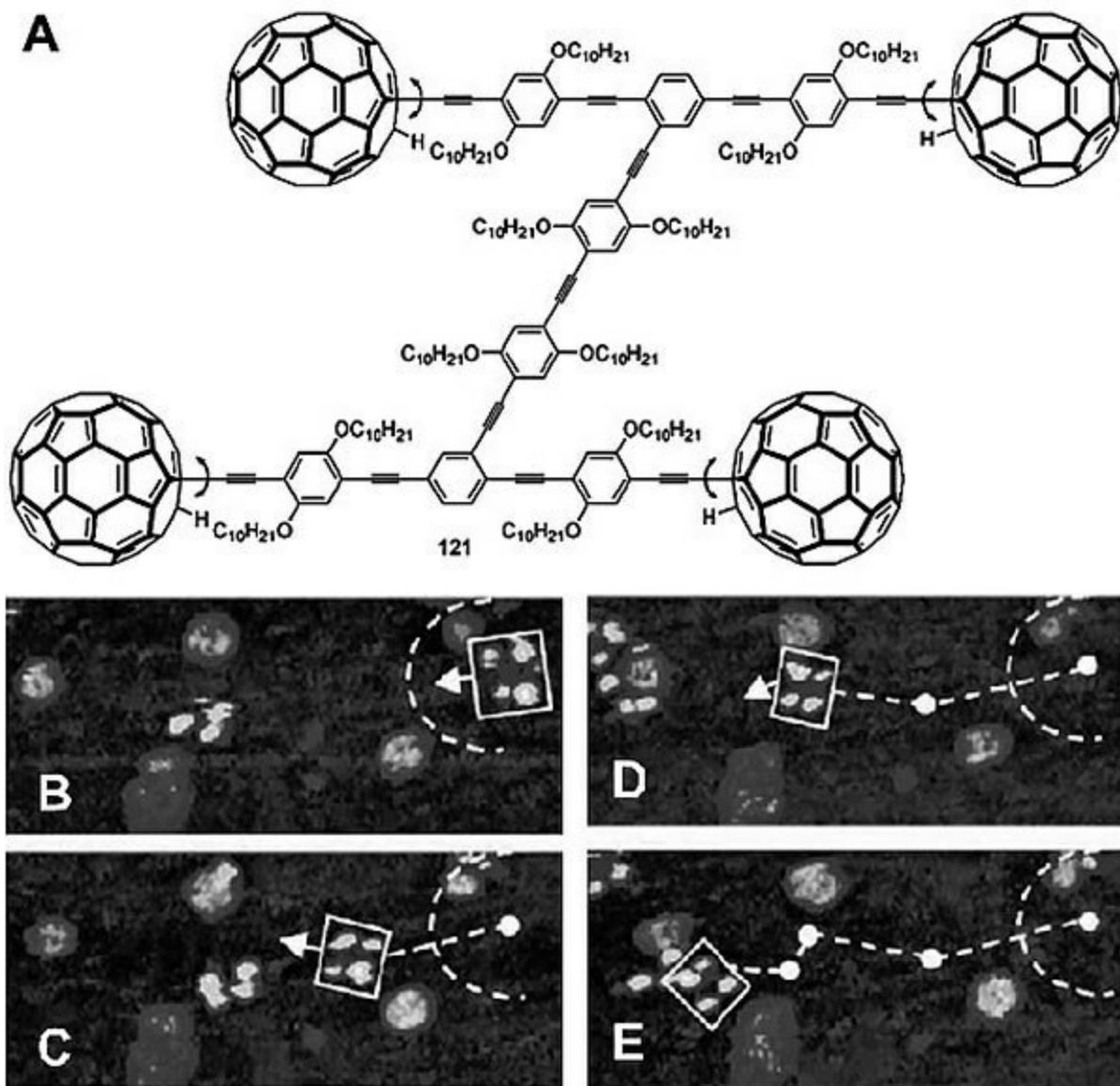


FIGURA 6.5. «Nanocoche» de dimensiones $3.3 \text{ nm} \times 2.1 \text{ nm}$. Serie de imágenes consecutivas de STM en las que se aprecia cómo el nanocoche se desplaza sobre una superficie al elevar la temperatura. Adaptada con permiso de *Nano Letters*, n.º 5, pp. 2330-2334. Copyright 2005, Sociedad Americana de Química.

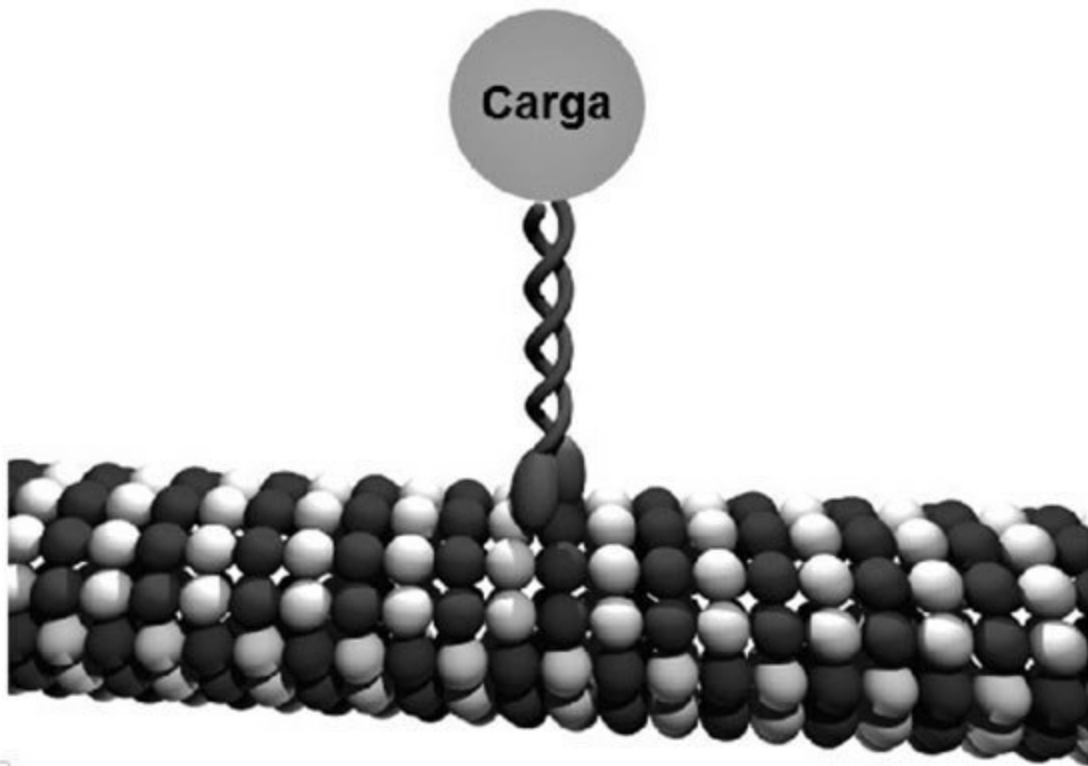


FIGURA 6.6. La proteína kinesina desplazándose a lo largo de una fibra del citoesqueleto con su carga a cuestas. La kinesina avanza «paso a paso» moviendo alternativamente los dos filamentos que actúan como si fuesen dos piernas. Adaptado de Wikipedia.

Otras proteínas también pueden considerarse, en cierto sentido, como bionanmotores moleculares. Éste es el caso de las ADN polimerasas, que desempeñan un papel fundamental en todas las células, siendo capaces de replicar moléculas de ADN a una enorme velocidad (por ejemplo, 50 000 nucleótidos por minuto en el caso de la bacteria *Escherichia coli*). Estas polimerasas avanzan por una de las hebras del ADN, reconocen cada nucleótido e incorporan el nucleótido complementario en la cadena naciente, de manera que se preserve la información con la mayor fidelidad posible. De hecho, para que las ADN polimerasas puedan realizar su trabajo es preciso que por delante de ellas se muevan otros nanomotores, las enzimas denominadas helicasas del ADN, que van rompiendo los puentes de hidrógeno entre bases nitrogenadas complementarias, como si fuesen unas nanotijeras, lo que permite la separación de las dos cadenas del ADN.

6.3. La formación de monocapas autoensambladas

Como ya hemos mencionado, los procesos de «autoensamblado» o «autorganización» conducen a la formación espontánea de estructuras organizadas gracias a las

interacciones locales que se producen entre diversos componentes que se encontraban presentes en un medio inicial desordenado.

Cuando el proceso de autoensamblado entre moléculas se produce sobre una superficie, se originan capas cuyo espesor corresponde a una sola molécula dispuesta sobre dicho soporte por lo que se denominan monocapas autoensambladas (en inglés, «*self assembled monolayers*» o *SAMs*). Para visualizar este proceso podemos imaginarnos las piezas de un puzle diseminadas encima de una mesa y cómo éstas van reconociéndose y encajándose unas con otras hasta lograr formar un paisaje, la escena de un cuadro o nuestro personaje preferido de dibujos animados. Para que este ejemplo se aproxime lo más posible al proceso de autoensamblado y autorganización de entidades moleculares, debemos continuar echándole imaginación pues las piezas de partida deben ser capaces de reconocerse entre sí y de colocarse de la manera adecuada por sí solas, es decir, espontáneamente. Además, al igual que ocurre en el caso de las piezas del puzle, las interacciones locales que se producen en los procesos de autoensamblado o autorganización cumplen, en general, con la propiedad de ser moderadamente débiles y reversibles.

Hoy en día este procedimiento de formación de monocapas autoensambladas se ha convertido en uno de los más empleados para modificar superficies, existiendo la posibilidad de fabricar una gran diversidad de ellas mediante la utilización de diferentes moléculas sobre distintos sustratos inorgánicos. Desde las primeras monocapas autoensambladas, que fueron desarrolladas en los años cuarenta sobre superficies de platino, el campo ha experimentado un gran auge sobre todo desde que se prepararon las primeras *SAMs* de alcanotioles sobre oro. Como puede verse en la Figura 6.7.A, un alcanotiol es una cadena hidrocarbonada terminada en un grupo ($-SH$), en la que pueden distinguirse tres partes: la cabeza o grupo de anclaje, el esqueleto o grupo espaciador y el grupo terminal o funcional. Como su propio nombre indica, el grupo de anclaje proporciona la afinidad química con el soporte y es, por tanto, el responsable de que se produzca la unión entre ambos. Gracias al esqueleto orgánico se logra la estabilización de la estructura mediante débiles interacciones (no covalentes) con los esqueletos de las moléculas vecinas. Por último el grupo terminal, que queda dirigido hacia el exterior, contiene una función química que puede ser, por ejemplo, un grupo metilo ($-CH_3$), un amino ($-NH_2$), un carboxilo ($-COOH$) y es el que va a definir tanto la reactividad como las propiedades físico-químicas de la superficie modificada, y por consiguiente sus posibles aplicaciones.

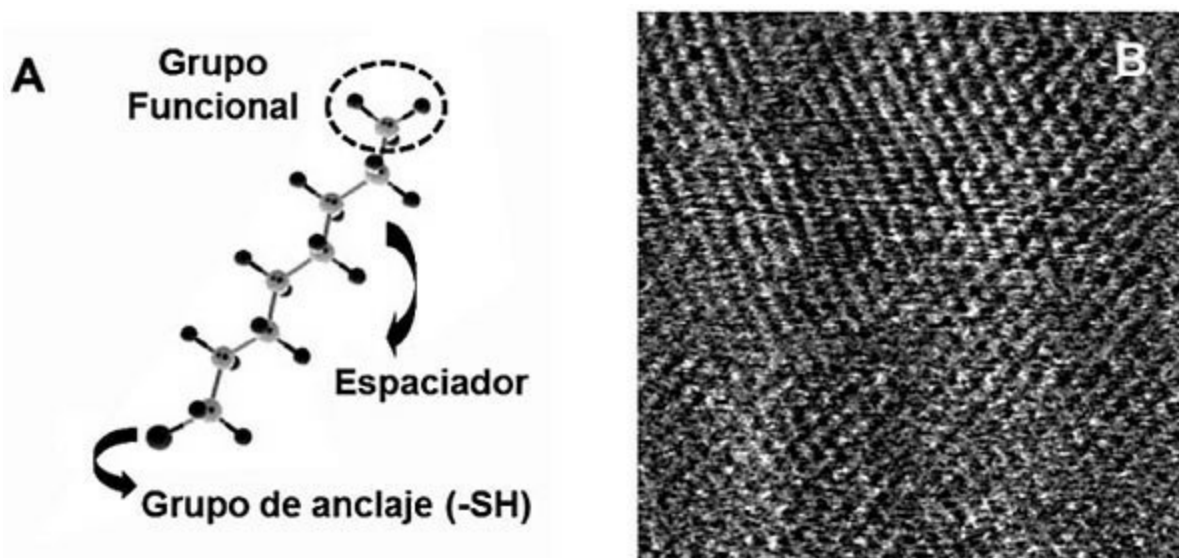


FIGURA 6.7. A) Estructura del 1-octanotiol ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{SH}$), donde las esferas grises son átomos de C, las negras átomos de H y la denominada grupo de anclaje un grupo $-\text{SH}$, B) Visualización por AFM de una monocapa autoensamblada del 1-octanotiol sobre una superficie de oro. La imagen mide $13 \times 13 \text{ nm}^2$. Gentileza del Dr. Luis Vázquez (ICMM-CSIC).

Las SAMs se pueden preparar evaporando las moléculas precursoras en vacío o a partir de una disolución de dichas moléculas, siendo este segundo método el más utilizado. El procedimiento consiste en sumergir durante un tiempo determinado el sustrato sobre el que se va a depositar la película, por ejemplo una placa de oro, en una disolución del alcanotiol elegido, por ejemplo, el 1-octanotiol. Durante el tiempo que la placa permanece en contacto con el alcanotiol ocurren varios procesos, aunque todos ellos de manera espontánea y sin necesidad de ninguna actuación externa. En primer lugar se produce una unión bastante fuerte entre el azufre (S) de la molécula y el oro (Au), lo que va a tener como consecuencia que las SAMs resultantes sean muy estables. Las moléculas, al principio, se colocan paralelas a la superficie (es como si estuviesen tumbadas). Pero a medida que va pasando el tiempo (y se van uniendo cada vez más moléculas a la superficie del Au), éstas van cambiando de posición, levantándose hasta colocarse con un ángulo de inclinación de unos 30° respecto de la vertical. Este ángulo de inclinación permite que se maximicen las interacciones entre las cadenas hidrocarbonadas. El tiempo necesario para que el proceso se complete depende de la concentración de la disolución de alcanotiol (es decir, del número de moléculas disueltas) en la que se introduce la placa de oro que se quiere modificar. Este tiempo suele ser de varias horas pues para que la densidad de moléculas que forman la SAM sea alta y el número de defectos bajo se necesita que las moléculas se reorganicen adecuadamente.

Las monocapas autoensambladas generadas pueden visualizarse utilizando un

microscopio de fuerzas atómicas (AFM), como los que se han descrito en el Capítulo 3. En la Figura 6.7.B se muestra como ejemplo una imagen obtenida por AFM de una monocapa de 1-octanotiol, $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{SH}$ formada sobre una superficie de oro. La punta del AFM, al acercarse a la superficie, «nota» la parte externa de las cadenas de alcanotioles, de manera que las protuberancias que se ven en la imagen se corresponden con los grupos terminales metilo ($-\text{CH}_3$). La imagen que ofrece el AFM de la monocapa es similar a la que obtendríamos al observar un campo de espigas sobrevolándolo a una altura baja.

Una importante consecuencia de la formación de una monocapa autoensamblada sobre una superficie es que las propiedades finales van a poder ser diferentes y además controlables en función de cuál sea el grupo terminal del alcanotiol que la forme. En el caso de la SAM que puede verse en la Figura 6.7.B, la superficie resultante es mucho más hidrofóbica que antes de formar la monocapa, lo que puede comprobarse colocando una gota de agua sobre ella. Al hacer esto, se observa como la gota se confina en el espacio más pequeño posible intentando minimizar su contacto con la superficie. La hidrofobicidad («repulsión hacia el agua») generada se debe a que el grupo terminal del alcanotiol es un grupo metilo ($-\text{CH}_3$) que se caracteriza por tener esta propiedad. Algunas de las posibles aplicaciones de las SAMs están relacionadas con el cambio de propiedades que inducen, pudiéndose utilizar, por ejemplo, para aumentar la resistencia a la corrosión o para reducir la fricción y la adherencia de una superficie.

Una vez formada la monocapa es posible usarla para llevar a cabo procesos de síntesis sobre la superficie pues al ir poniéndola en contacto con diferentes compuestos, éstos van a ir incorporándose en fases sucesivas. Esto se logra gracias a la interacción que se produce entre el grupo terminal que se encuentra presente en la monocapa y el grupo funcional del compuesto que se pretende incorporar. Para ello es preciso elegir un alcanotiol para formar la monocapa que presente un grupo funcional en su estructura adecuado a la reacción posterior que queramos que se produzca. Mediante este grupo es posible unir distintas moléculas a través de un enlace covalente o bien adsorberlas por interacciones más débiles de tipo, por ejemplo, electrostáticas o puentes de hidrógeno. Así, monocapas autoensambladas que exponen hacia el exterior grupos carboxilo ($-\text{COOH}$), hidroxilo ($-\text{OH}$) o amino ($-\text{NH}_2$) son ampliamente utilizadas como punto de partida en estos procesos de síntesis superficial, en los que un control preciso de la reactividad permite construir diversas nanoestructuras con infinidad de aplicaciones potenciales. En particular, y como veremos en el siguiente apartado, pueden utilizarse en el desarrollo de biosensores para lograr la conexión entre dos de

sus componentes principales, el «transductor» y el elemento de reconocimiento biológico.

6.4. Los biosensores y sus aplicaciones

La importancia de determinar la concentración de una sustancia dada en una muestra es indudable y, aunque no nos demos cuenta, cada uno de nosotros realiza este tipo de análisis en su vida cotidiana. ¿Quién no ha olido el contenido de un paquete de leche que lleva varios días en la nevera antes de decidir si lo utiliza o no para hacerse el desayuno? Pues bien, de una manera tan sencilla realmente estamos evaluando si en la leche han proliferado ciertas bacterias y si, por tanto, nos tomamos un café solo o con leche. Los ejemplos que ilustran la necesidad de realizar mediciones cuantitativas son innumerables. En multitud de ocasiones es preciso, por ejemplo, disponer de métodos que nos permitan determinar la concentración de sustancias contaminantes en el aire que respiramos o el contenido de diversos compuestos (glucosa, colesterol) en nuestra sangre; así como establecer rigurosos procesos de control de calidad que permitan asegurarnos de que todos los productos que utilizamos habitualmente, ya sean medicinas, productos de limpieza, alimentos, bebidas o ropa, son seguros para nosotros. Todo ello ha llevado a que, a lo largo del tiempo, se hayan desarrollado numerosos métodos de análisis que van desde los más sencillos que pueden realizarse en cualquier laboratorio (por ejemplo, una valoración) hasta los que requieren de técnicas mucho más complejas (¿quién no sabe cómo se solucionan la mayor parte de los problemas de identificación de compuestos en la serie de televisión CSI?: ¡al espectrómetro!).

En la sociedad actual cada vez se hace más necesario el uso de dispositivos de análisis que sean fiables, selectivos, sensibles, de fácil manejo, baratos y que requieran poca cantidad y el mínimo pretratamiento de muestra posible. En este sentido, en los años sesenta se empezaron a desarrollar una serie de dispositivos, que posteriormente se denominaron biosensores.

Los biosensores son dispositivos que permiten determinar la presencia o concentración de sustancias de interés (denominados analitos o moléculas diana) en una determinada muestra y en su construcción desempeñan un importante papel los procesos de síntesis superficial descritos en el apartado anterior. Estos dispositivos compactos de análisis incorporan dos partes fundamentales: un elemento de reconocimiento biológico (sonda) encargado de interactuar selectivamente con la diana que se quiere determinar y un elemento denominado «transductor». El sistema de «transducción» se

encarga de convertir las variaciones de las propiedades físico-químicas producidas como consecuencia de la interacción entre el analito y la sonda en una señal medible (Figura 6.8). A partir de la señal generada es posible obtener la concentración del analito en la muestra. La combinación de estas dos partes del biosensor, una biológica y otra inerte, es lo que confiere al dispositivo sus dos características principales: 1) especificidad o selectividad, ya que el elemento biológico es capaz de reconocer un analito aunque se encuentre en presencia de muchas otras sustancias; y 2) sensibilidad pues es posible determinar concentraciones muy pequeñas del analito en la muestra.

Como elementos de reconocimiento biológico pueden utilizarse proteínas (como anticuerpos o enzimas), fragmentos de ácidos nucleicos naturales o moléculas análogas artificiales, agregados moleculares formados por los elementos anteriores, virus, células completas o incluso fragmentos de tejidos. A su vez la «transducción» de la señal se puede realizar utilizando un amplio repertorio de sistemas ópticos, eléctricos, electroquímicos, mecánicos o de otro tipo, que pueden requerir, o no, el marcaje previo (por ejemplo, mediante compuestos fluorescentes) del analito.

Para ilustrar el funcionamiento de este tipo de dispositivos de análisis imaginemos, en primer lugar, que se quiere determinar la presencia o ausencia de la bacteria *Helicobacter pylori* en una determinada muestra. La detección de esta bacteria presenta una gran importancia pues es, por ejemplo, la responsable de provocar úlceras, algunos tipos de gastritis e incluso cáncer de estómago. En este caso podría desarrollarse un biosensor que utilizase como sonda una secuencia sintética de nucleótidos complementaria a una secuencia de la bacteria *Helicobacter pylori*. De esta manera, al poner el biosensor en contacto con la muestra, si en ésta se encuentra presente la bacteria, se producirá el reconocimiento entre la secuencia sonda y la diana (analito). En segundo lugar, imaginemos que se quiere determinar la concentración de polifenoles, que son sustancias que presentan importantes propiedades antioxidantes, en una muestra de vino o en una infusión de hierbas. Para ello podría desarrollarse un biosensor biocatalítico donde la sonda fuese una enzima denominada lacasa que se caracteriza por «reconocer» a este tipo de sustancias. En este caso la enzima cataliza una reacción que implica la oxidación de los polifenoles, originándose un producto de reacción que es electroactivo, es decir, es capaz de dar lugar a una señal electroquímica que se puede relacionar con la concentración del analito.

En un biosensor el elemento de reconocimiento biológico y el transductor deben encontrarse íntimamente asociados, por lo que es necesario anclar el primero sobre la superficie del segundo. Este proceso de inmovilización constituye una etapa crucial en el desarrollo de este tipo de dispositivos, ya que puede tener como consecuencia una alteración de las características del elemento de reconocimiento y, por tanto, una

disminución de su capacidad para reconocer al analito. Como ya hemos mencionado anteriormente, para llevar a cabo el proceso de inmovilización de la sonda sobre el transductor son de gran utilidad los procesos de síntesis superficial que utilizan la formación de monocapas autoensambladas. Pongamos un ejemplo concreto. Imaginemos que el objetivo es desarrollar un biosensor que permita determinar la concentración de glucosa en la sangre de un paciente diabético. Una posibilidad es utilizar como sonda una enzima denominada glucosa oxidasa, pues ésta presenta la propiedad de reconocer glucosa (analito o sustancia diana). El primer paso en la construcción de dicho biosensor consistiría en inmovilizar la enzima sobre el transductor, que podría ser un electrodo de oro. Para ello, sobre esta superficie se formaría una monocapa autoensamblada de un alcanotiol que tuviese como terminación libre un grupo funcional capaz de reaccionar con los grupos presentes en la enzima glucosa oxidasa. Así, de una manera sencilla se habría logrado el anclaje.

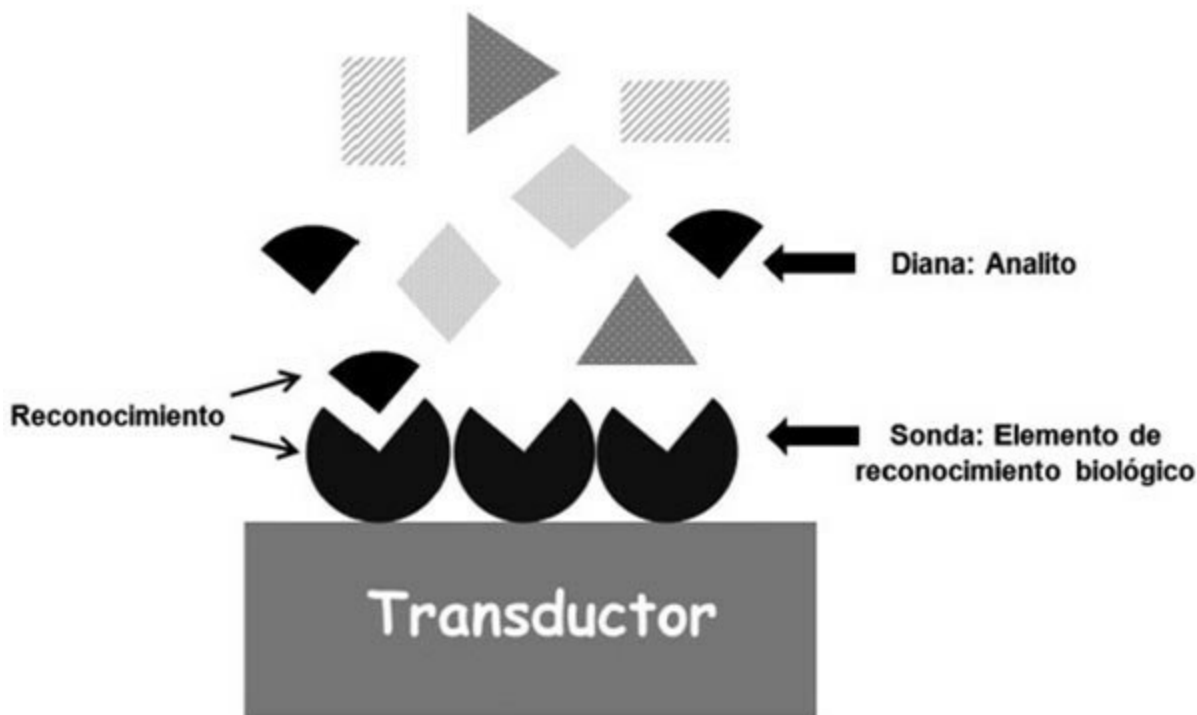


FIGURA 6.8. Esquema de funcionamiento de un biosensor formado por un elemento de reconocimiento biológico y un transductor.

La glucosa es sólo un ejemplo de analito que puede ser determinado utilizando un biosensor, pero en la actualidad existen muchos biosensores diferentes que permiten la determinación de analitos muy variados en muestras de muy diversa naturaleza, por ejemplo sangre, vino o agua de río. Como consecuencia, las aplicaciones son numerosas en los campos agroalimentario, medioambiental, químico, farmacéutico o biotecnológico.

Debido a su enorme potencialidad, en la actualidad numerosos grupos de investigación, muchos de ellos españoles, trabajan en el desarrollo de dispositivos de este tipo que cada vez ofrezcan mejores prestaciones. Así, en la tecnología de biosensores ha supuesto un avance importantísimo el desarrollo de microarrays y, posteriormente, de nanoarrays (matrices de puntos micro y nanométricos, respectivamente, en cada uno de los cuales hay un tipo de molécula sonda) que, como se verá en el Apartado 7.8, han logrado que la multidetección sea más rápida, se realice en un menor espacio y requiera un menor volumen de muestra.

Dando un paso más en este campo de investigación, otra de las tendencias de los últimos años está basada en la incorporación de nanomateriales a este tipo de dispositivos. Para hacernos una idea del impulso que está ofreciendo esta estrategia al desarrollo de biosensores es suficiente con echar un vistazo a los últimos trabajos de investigación relacionados con el tema. Así, de las publicaciones aparecidas en los últimos años relativas al diseño de, por ejemplo, biosensores enzimáticos electroquímicos, un gran número de ellas supone la incorporación de algún tipo de nanomaterial a la plataforma bioanalítica. Con esta estrategia se consigue que a las ventajas habituales que conllevan este tipo de dispositivos (alta selectividad aportada por la enzima y elevada sensibilidad inherente a las técnicas electroquímicas) se le añadan las características útiles provenientes del nanomaterial que se haya incorporado. Entre la amplia variedad de nanomateriales que pueden ser utilizados, destacan los nanotubos de carbono, el grafeno y las nanopartículas metálicas. Continuemos con el ejemplo anterior de un biosensor electroquímico para la detección de glucosa y veamos qué ventajas podría aportar la incorporación de un nanomaterial (por ejemplo, nanopartículas de oro) a su estructura. Éstas poseen la característica de que, como veremos posteriormente, pueden ser sintetizadas de manera sencilla, presentando unas propiedades electrónicas y catalíticas muy interesantes. El empleo de dichas nanosuperficies metálicas de forma esférica presenta indiscutibles ventajas para adsorber enzimas frente a la utilización de una superficie plana. En primer lugar, aumentan mucho la superficie útil sobre la que puede inmovilizarse la sonda y, en segundo lugar, al ser posible una mayor libertad de orientación, se disminuyen las tensiones en la enzima (en este caso la glucosa oxidasa) durante el proceso de inmovilización, evitando que ésta pierda su actividad biológica, lo que la dejaría inactiva para poder reconocer al analito (glucosa). Además, dicha detección puede verse favorecida por la presencia de las nanopartículas, al ayudar éstas a la transferencia de electrones entre la enzima y el electrodo.

La falta de movilidad de los dispositivos generados por autoensamblado molecular sobre superficies puede suponer una desventaja a la hora de desarrollar diversas

aplicaciones, haciéndose patente el interés de disponer de soportes más versátiles que superen esta limitación. Una posibilidad muy interesante a este respecto, que además combina algunos de los conceptos barajados hasta el momento, es el empleo de micro- y nanomotores propulsados químicamente y funcionalizados de manera que puedan ser utilizados para fines concretos. Fines tales como construir biosensores que permitan, por ejemplo, el reconocimiento y aislamiento de una sustancia diana en un fluido complejo y su posterior transporte hasta el lugar donde se realizará el análisis.

En la Figura 6.9 puede verse la forma que presentan estos dispositivos. Son tubos con forma cónica, que se encuentran huecos y están recubiertos internamente por un material catalítico, en concreto el platino. El mecanismo que permite el desplazamiento del dispositivo está basado en una reacción química: la descomposición de peróxido de hidrógeno (es decir, agua oxigenada H_2O_2) sobre la superficie catalítica interna de platino para formar oxígeno y agua. Las burbujas de oxígeno generadas como consecuencia de esta reacción se encargan de propulsar el micromotor. En los primeros diseños las dimensiones típicas eran de 50-100 μm de largo y 2-10 μm de diámetro y se alcanzaban velocidades del orden de 200 $\mu m/s$. En la actualidad numerosas investigaciones en este campo van dirigidas a mejorar la eficiencia en la propulsión, es decir, se trata de lograr mayores velocidades con un consumo menor de combustible. En la velocidad alcanzada influyen varios factores, como el diseño del micromotor, la utilización de estímulos externos y el tipo de «combustible» utilizado. En este sentido, se ha logrado mejorar la velocidad de estos diminutos «submarinos» mediante un aumento de temperatura, así como mediante el empleo de diversas mezclas de peróxido de hidrógeno con otros compuestos. Lograr disminuir la cantidad de peróxido de hidrógeno empleado para hacer funcionar el dispositivo es muy recomendable en, por ejemplo, aplicaciones biomédicas, donde la toxicidad tiene un papel importante.

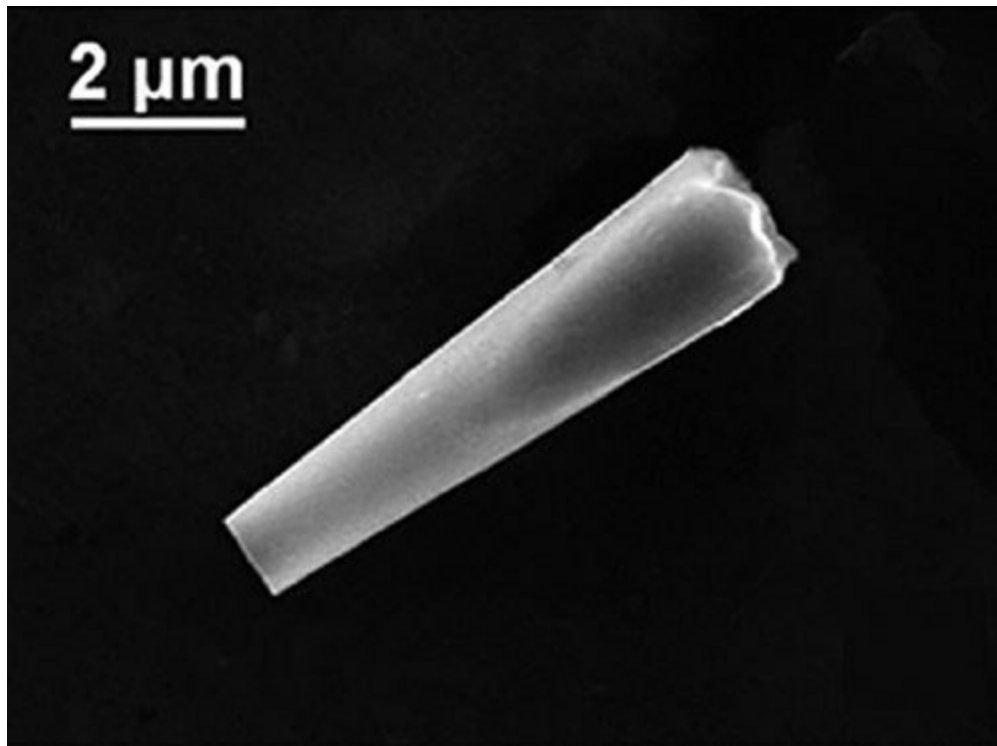


FIGURA 6.9. Imagen SEM de un micromotor. Reproducido con permiso de *Journal of the American Chemical Society*, n.º 133, pp. 11 862-11 864. Copyright 2011 Sociedad Americana de Química.

Así, se está consiguiendo fabricar micromotores cada vez más pequeños (en torno a una decena de μm de largo) que alcanzan velocidades de varios miles de $\mu\text{m/s}$, siendo éste un valor muy elevado si tenemos en cuenta su pequeño tamaño. Si relacionamos la velocidad alcanzada con el tamaño del dispositivo, encontramos que se han desarrollado dispositivos que avanzan en torno a 375 veces su longitud por segundo. Para hacernos una idea pensemos que la velocidad máxima de un Ferrari es de 350 km/h, lo que significa que se desplaza unas 20 veces su longitud por segundo.

Los micromotores descritos permiten, pues, la transformación de energía química en movimiento autónomo. Este movimiento puede ser al azar o bien guiado magnéticamente siguiendo un camino prefijado, para lo cual es necesario haber introducido previamente en el dispositivo una capa de un material ferromagnético. Si además la pared externa se encuentra recubierta de oro, es posible modificarla, utilizando la química descrita anteriormente, con diferentes moléculas que contengan un grupo tiol: el tipo de modificación dependerá de la aplicación a la que vaya a destinarse. Una interesante aplicación en el campo medioambiental es la propuesta por el profesor J. Wang de la Universidad de California (EE.UU.) en colaboración con dos grupos de investigación españoles y consiste en utilizar estos dispositivos para eliminar aceite de aguas contaminadas. Para ello se recubrió el micromotor con un tiol con características hidrofóbicas (similar al representado en la Figura 6.7A, es decir con un

grupo metilo ($-\text{CH}_3$) en el extremo expuesto hacia el entorno). Al ir desplazándose por una muestra contaminada, el dispositivo tiende a repeler el agua, pero por el contrario, a él se adhieren las sustancias de tipo aceitoso, todo ello gracias a las propiedades del alcanotiol que lo recubre. Varios de estos «submarinos» en acción, capaces de capturar y transportar gotas de aceite, pueden verse en el enlace <<http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/nm301175b>>.

Variando el tipo de modificación que se realice en el micromotor, pueden detectarse una gran diversidad de analitos. Si se modificase la parte exterior del micromotor con una cadena sencilla de ADN (funcionalizada previamente con un tiol para que pueda unirse a la superficie de oro), al introducir el dispositivo en una muestra biológica (sangre, orina o saliva), éste se desplazará permitiendo que las cadenas de ADN que lleva inmovilizadas en su superficie se hibriden con cadenas complementarias, si es que éstas se encuentran presentes en la muestra. El dispositivo, por tanto, permite capturar, aislar y transportar un analito (que se encuentra en una muestra compleja, es decir, que contiene una gran variedad de sustancias) de una manera sencilla, rápida y directa, sin necesidad de ningún tratamiento previo.

Aunque la velocidad de desplazamiento de estos dispositivos es inferior a la que tendrían si su superficie no se hubiese modificado con alcanotioles (pues éstos pueden «envenenar» la superficie catalítica del platino), tienen una autonomía elevada para moverse por fluidos biológicos (durante más de 30 minutos) y una fuerza suficiente para transportar «cargas» de gran tamaño (por ejemplo, células cancerígenas). Aunque en el ejemplo mencionado, el analito que se aísla, transporta y detecta es ADN, queda claro que modificando la superficie externa del motor con un receptor adecuado, el concepto puede extenderse a la detección de otras dianas como proteínas, virus, bacterias o células cancerígenas, abriendo así enormes posibilidades en áreas como el diagnóstico molecular o el análisis forense.

Además de los micromotores comentados, también se han desarrollado nanomotores que consisten en nanohilos bimetálicos de platino y oro (Pt-Au) que siguen un esquema de funcionamiento parecido, basado en la descomposición electrocatalítica del peróxido de hidrógeno. La inspiración de estos dispositivos sintéticos que permiten el aislamiento de la molécula diana y su posterior transporte podrían ser ciertos nanomotores biológicos, como la kinesina o la miosina (proteína fibrosa implicada en la contracción muscular), en los que el movimiento también es posible gracias a la energía proveniente de una reacción química, la hidrólisis del ATP.

6.5. Las nanopartículas metálicas: síntesis y aplicaciones

Otra posibilidad para superar la falta de movilidad de los dispositivos generados por autoensamblado molecular sobre superficies puede consistir en sustituir la superficie metálica plana sobre la que se incorpora el material biológico por nanopartículas inorgánicas capaces de moverse por un medio líquido.

Como su propio nombre indica, el término «nanopartícula» designa una agrupación de átomos o moléculas que dan lugar a una partícula con dimensiones nanométricas (diámetro comprendido entre 1 y 100 nm). Estas nanopartículas generalmente están formadas por metales u óxidos metálicos y pueden funcionalizarse, es decir, pueden recubrirse por capas exteriores de distintos materiales para dotarlas de nuevas capacidades.

Aunque hoy en día las nanopartículas metálicas desempeñan un importante papel en nanotecnología, estas estructuras han sido utilizadas desde la antigüedad sin tener conciencia de ello, tanto con fines médicos como artísticos. Son, por ejemplo, las responsables de los impresionantes colores de las vidrieras de algunas catedrales. Curiosamente, si las nanopartículas que se han mezclado con el vidrio son de plata, se originan tonalidades amarillas, mientras que si son de oro se consiguen tonos rojizos. Esto puede resultar sorprendente pues en nuestro mundo macroscópico el color que asociamos inmediatamente al oro es el amarillo y a la plata es el gris. La explicación se encuentra en un hecho que ya hemos comentado a lo largo de este libro, y es que el tamaño de los materiales importa, pues condiciona las propiedades electrónicas, magnéticas, mecánicas y ópticas que éste va a presentar (ver Figura 2.5). Así, por ejemplo, en el siglo XIX lord Kelvin, creador de la escala de temperatura que lleva su nombre, se planteó la pregunta de si la temperatura de fusión de una partícula pequeña podía depender de su tamaño. La respuesta se obtuvo ya en el siglo XX, cuando se determinó que la temperatura de fusión de las nanopartículas de oro era de 700 K, valor muy inferior a la temperatura de fusión del oro (en torno a 1300 K). También en el siglo XIX, M. Faraday descubrió que suspensiones coloidales de oro preparadas de forma diferente presentaban distintas coloraciones. Aunque M. Faraday atribuyó de forma correcta dicho cambio de color a la existencia de partículas de distinto tamaño, el fenómeno no pudo explicarse completamente hasta principios del siglo XX.

Las nanopartículas metálicas pueden ser sintetizadas con distintos materiales, tamaños, formas y, por consiguiente, propiedades. El procedimiento de síntesis es, en

principio, sencillo. Por ejemplo, para sintetizar nanopartículas de oro basta con hacer reaccionar un compuesto que contiene oro (HAuCl_4) con un compuesto reductor, como el citrato sódico. Así se van formando agrupaciones de átomos de oro que acaban constituyendo nanopartículas de un determinado tamaño, dependiente de las cantidades de agente reductor utilizadas.

Las nanopartículas presentan una serie de propiedades que las hacen idóneas para aplicaciones biomédicas (algunas de las cuales se describen en los apartados 7.10 y 8.6). Debido a su pequeño tamaño pueden circular por el torrente sanguíneo sin impedimentos y llegar a puntos concretos del organismo. Son, además, fáciles de recubrir con materiales que las conviertan en biocompatibles, en caso de que ellas no lo sean. En este sentido, las nanopartículas de mayor aplicabilidad en biomedicina se fabrican con metales nobles (oro, plata o sus aleaciones), ya que son los más inertes en el organismo y por lo tanto los que más difícilmente producirán problemas de toxicidad cuando estén en contacto con nuestro cuerpo. En ocasiones, las nanopartículas desarrolladas con fines terapéuticos tienen un núcleo magnético (de óxido de hierro u otros metales) que las convierte en auténticos «nanoimanes» recubiertos por biomoléculas. Con ello se puede lograr que viajen por el organismo siguiendo caminos prefijados sin más que aplicar un campo magnético desde el exterior.

Para lograr unir las biomoléculas a las nanopartículas se puede recurrir a la metodología descrita anteriormente basada en el autoensamblado. Si las nanopartículas son de oro, en un primer paso se pueden inmovilizar sobre ellas compuestos que contengan un grupo tiol en un extremo y un grupo reactivo (X), en el otro extremo (donde X puede representar, por ejemplo, grupos $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$). En una segunda etapa, se pueden unir al grupo X diversos compuestos (anticuerpos, cadenas de ADN, fármacos, sondas de diagnóstico, etc) que podrán desempeñar funciones concretas dentro del organismo, por ejemplo enlazarse a objetivos específicos, como pueden ser las células tumorales, o liberarse de forma controlada respondiendo a algún estímulo externo.

Otra importante aplicación de las nanopartículas es su utilización como catalizadores de numerosas reacciones químicas, permitiendo sintetizar productos de interés industrial con un menor coste económico y de una manera menos agresiva con el medioambiente. En una situación ideal se trata de, al utilizar una vía catalítica frente a otra no catalítica, reducir el número de pasos de la síntesis, obtener de forma mayoritaria el producto deseado sin que sea necesario separarlo después de otros productos formados, y no generar residuos tóxicos que haya que eliminar. De nuevo, vuelve a surgir el concepto de «química verde», en un intento de minimizar el impacto

medioambiental de los procesos industriales y domésticos.

6.6. Los polímeros conductores

Por último, y para acabar este capítulo, haremos referencia a unos compuestos que ya han aparecido anteriormente, al hablar de posibles candidatos que podrían reemplazar al silicio en nanoelectrónica, los polímeros conductores. El descubrimiento de estos materiales, allá por los años setenta, es un claro exponente de una de las características que ya hemos destacado de la nanotecnología, su elevada interdisciplinariedad. Concretamente en 1977, tres científicos (H. Shirakawa, A. MacDiarmid y A. Heeger), que trabajaban en distintas disciplinas (química de polímeros, química inorgánica y física) y vivían en extremos opuestos del mundo (Japón y Estados Unidos) publicaron un artículo científico sobre la síntesis de un polímero orgánico que sorprendentemente no se comportaba como un aislante, sino como un conductor y que supondría un hito importante como demostró la concesión en el año 2000 del Premio Nobel de Química a sus descubridores. El cómo se llegó a este desenlace es una historia curiosa que mezcla arbitrarios errores experimentales, charlas en torno a una taza de té, y cómo no, una pasión profunda por la ciencia. Por un lado, A. MacDiarmid y A. Heeger se pusieron en contacto pues ambos estaban interesados en el estudio de ciertos polímeros, como los polímeros de nitruro de azufre $(\text{SN})_x$ pues poseían propiedades eléctricas similares a las de los metales. Por otro lado, en el laboratorio de H. Shirakawa, en Japón, un estudiante cometió un error, y en el proceso de síntesis de otro polímero, el poliacetileno, añadió mil veces más de lo necesario de uno de los reactivos, obteniendo, en lugar del polvo negro habitual, un material completamente distinto con aspecto metálico. Cuando en torno a una taza de té, H. Shirakawa mostró casualmente el producto sintetizado a A. MacDiarmid, profesor de la Universidad de Pensilvania que se encontraba impartiendo una conferencia en Japón, ambos decidieron colaborar (junto con A. Heeger) y estudiar las propiedades de tan interesante compuesto. Así, una vez en la Universidad de Pensilvania, comprobaron que al someter a un determinado tratamiento al poliacetileno (utilizando vapor de cloro, bromo o yodo) sus propiedades electrónicas cambiaban extraordinariamente. En concreto, se vio que al doparlo de esta manera su conductividad aumentaba, en pocos minutos, hasta diez millones de veces, llegando a alcanzarse valores típicos de buenos conductores metálicos, como el cobre. No es difícil llegar a comprender cómo el desarrollo de esta nueva clase de polímeros orgánicos que, además de ser flexibles y transparentes, presentan la inusual propiedad

de ser capaces de conducir la corriente eléctrica ha abierto la puerta al desarrollo de un elevado número de aplicaciones. Como se comentó en el Capítulo 5, se está trabajando, por ejemplo, en la fabricación de transistores y otros componentes electrónicos formados por moléculas individuales, lo que permitiría que se realizasen notables avances en electrónica molecular.

Los polímeros conductores más comunes, como el poliacetileno o el polipirrol, están formados por cadenas carbonadas que alternan dobles enlaces (C=C) con enlaces sencillos (C-C).

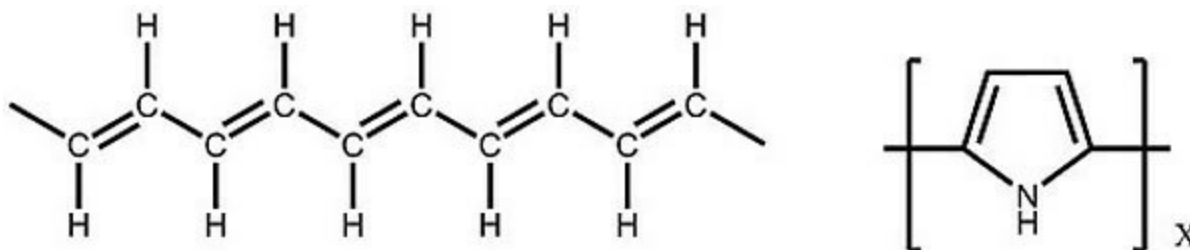


FIGURA 6.10. Ejemplos de polímeros conductores: poliacetileno (izquierda) y polipirrol (derecha).

Aunque en principio, su conductividad es baja, ésta va aumentando progresivamente al ser oxidados. Esta oxidación puede lograrse por diversos métodos, por ejemplo, realizando una oxidación electroquímica. La diferencia de propiedades que existe entre las dos formas del polímero conductor, oxidado y reducido, y el hecho de que el proceso que convierte uno en otro es reversible es la base de numerosas aplicaciones. Así, por ejemplo, el proceso de oxidar/reducir una película de polímero conductor puede ir acompañado de un cambio de color y reflectividad, lo que puede aprovecharse para construir ventanas inteligentes, es decir, ventanas capaces de modular por sí mismas la intensidad de la luz que dejan pasar. A su vez, al oxidar un polímero conductor se está produciendo un almacenamiento de carga a lo largo de la cadena polimérica, y por tanto, estos compuestos pueden ser utilizados en el desarrollo de baterías.

La oxidación/reducción también provoca un cambio en la longitud y espesor del compuesto que responde a la apertura/cierre de la red polimérica. Antes de oxidar el polímero, éste se encuentra neutro, dando lugar a una estructura compacta. Al oxidar, se produce un aumento de volumen pues aparecen cargas positivas a lo largo de las cadenas poliméricas que provocan repulsiones electrostáticas y, como consecuencia, se origina una estructura más abierta (más porosa) en la que penetran contraiones solvatados. Dependiendo del grado de oxidación, el polímero puede expandirse en mayor o en menor medida. En el proceso de reducción, estos contraiones solvatados son expulsados y se produce una disminución de volumen. En este caso, nos

encontramos de nuevo ante la idea de que un cambio externo (en este caso la aplicación de un potencial que permita oxidar o reducir) es capaz de provocar un movimiento mecánico. Y esto nos recuerda al funcionamiento de cualquiera de los músculos que tenemos en nuestro cuerpo, los cuales generan movimiento al contraerse como efecto de la estimulación por parte de impulsos nerviosos provenientes del cerebro. Por tanto, otra aplicación de gran importancia de los polímeros conductores, es su utilización en el desarrollo de músculos artificiales, que podrían utilizarse para, por ejemplo, construir brazos y dedos robóticos.

NANOBIOTECNOLOGÍA Y NANOMEDICINA

Una de las cuestiones que más me atraían era la estructura del cuerpo humano y de cualquier ser vivo. Frecuentemente me preguntaba de dónde vendría el principio de la vida. Era una pregunta osada, ya que siempre se ha considerado un misterio. Tras noches y días de increíble labor y fatiga, conseguí descubrir el origen de la generación, de la vida; es más, yo mismo estaba capacitado para infundir vida en la materia inerte. Me preparé para múltiples contratiempos; mis intentos podrían frustrarse, y mi labor resultar finalmente imperfecta. Sin embargo, me animaba cuando consideraba los avances que día a día se producen en las ciencias y la mecánica, pensando que mis experimentos al menos servirían como base para futuros éxitos. Tampoco podía tomar la amplitud y complejidad de mi proyecto como excusa para no intentarlo siquiera. Imbuido de estos sentimientos, comencé la creación de un ser humano.

MARY W. SHELLEY, *Frankenstein o el moderno Prometeo*, 1818

7.1. La vida y el nanomundo

Decenas de millones de especies habitan en nuestro planeta. En todas ellas, tanto en los omnipresentes microorganismos como en los seres pluricelulares, su unidad estructural y funcional es la célula. Sin embargo, las células son sistemas relativamente complejos y muy organizados, y dentro de ellas bulle un mundo de moléculas reaccionando e interaccionando entre sí, formando agregados de diferente tipo que se sintetizan y degradan constantemente. La vida es, en el fondo, una constante danza de moléculas dominadas por los mismos parámetros termodinámicos y cinéticos que rigen toda la química, con la particularidad de que dichas moléculas y sus interacciones han sido seleccionadas por la evolución. Para ello, la vida requiere la existencia de compartimentos celulares en los que la materia se ordena gracias a un continuo consumo de energía, frente a su heterogéneo y cada vez más desordenado entorno. El consumo de energía por el sistema vivo le permite mantenerse alejado del equilibrio termodinámico y ser capaz de evolucionar. De hecho, no existe vida sin evolución, como ya Charles R. Darwin demostró hace un siglo y medio.

Las biomoléculas que nos constituyen son nanoestructuras, disposiciones tridimensionales de átomos cuyo tamaño está en el rango de los nanómetros. Durante las últimas décadas hemos avanzado mucho en el estudio de la estructura y función de las

moléculas biológicas, y las herramientas de la nanotecnología nos permiten analizarlas y manipularlas una a una. Así, un nuevo campo, conocido como «nanobiotecnología» o «bionanotecnología» ha surgido con fuerza gracias al esfuerzo combinado de biólogos, químicos, físicos e ingenieros. Éste es un claro ejemplo de la convergencia de ciencias de la cual hablaremos en el Capítulo 8. Con ello, el mundo de lo «nanobio» está ya cambiando la biotecnología y la medicina, y sus avances van a condicionar desde los biosensores que usamos hasta los fármacos que puedan salvarnos la vida. Además, estos desarrollos nos están permitiendo comprender mejor cómo pudo originarse la vida, con lo que también nos acercan a una posibilidad aún remota pero ciertamente inquietante: sintetizar seres vivos en el laboratorio ensamblando sus moléculas una a una.

7.2. La química de la vida

Los seres vivos estamos constituidos por un número muy limitado de elementos de la tabla periódica. De hecho, sólo seis de ellos son responsables del 99% de la masa de casi cualquier organismo: oxígeno (cuyo símbolo en la tabla periódica es O: de media, el 65,9% de la masa), carbono (C: 18,3%), hidrógeno (H: 10,2%), nitrógeno (N: 3,2%), fósforo (P: 1,1%) y azufre (S: 0,3%). El 1% restante lo forman los conocidos como «oligoelementos», entre los que están (empleando su símbolo): Na, K, Mg, Ca, Cr, Mo, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, B, Al, Si, Sn, Se, F, Cl y I. La abundancia del oxígeno y el hidrógeno se debe a que el agua (H_2O) es un componente fundamental de los seres vivos, en los que actúa como soporte estructural, estabilizador térmico y disolvente, y en cuyo seno se realizan la mayor parte de las reacciones químicas que requiere la vida. Además, la alta proporción de carbono nos dice que éste es el elemento fundamental en las biomoléculas, ya que posee unas propiedades inmejorables para formar enlaces covalentes consigo mismo y con los demás elementos mayoritarios de la vida. Por tanto, somos básicamente agua y carbono.

El agua, las sales minerales y las moléculas más sencillas de los seres vivos (como el NH_3 , el NO , o el CO_2), poseen un tamaño de tan sólo 0,2-0,4 nm. El siguiente grupo (en complejidad y tamaño) lo forma un amplio repertorio de compuestos orgánicos pequeños como glicerol, urea, glucosa, vitaminas, algunas hormonas y diferentes tipos de biomoléculas que son transformados constantemente por el metabolismo, y tienen tamaños en el rango de 0,3 a 0,6 nm. Entre estas moléculas pequeñas están también los monómeros de las macromoléculas biológicas: ácidos grasos (por ejemplo, el ácido

oleico o el palmítico), azúcares simples monosacáridos (como la glucosa o la fructosa), aminoácidos (entre ellos los veinte que constituyen las proteínas), y nucleótidos (cinco de los cuales forman los ácidos nucleicos, y algunos como el adenosín trifosfato o ATP son además moléculas ricas en energía usadas en el metabolismo). Su tamaño está entre 0,4 y 1 nm. Por último, las macromoléculas biológicas son los lípidos complejos (como los fosfolípidos que forman las membranas celulares), los polisacáridos (por ejemplo, la celulosa), las proteínas, y los ácidos nucleicos (ácido desoxirribonucleico o ADN y ácido ribonucleico o ARN). Algunos tamaños típicos de las macromoléculas son los siguientes: diámetro de las hélices que pueden formar los aminoácidos al unirse, 0,46 nm; diámetro de la doble hélice del ADN, 2 nm; diámetro de la hemoglobina (proteína que transporta el oxígeno en nuestra sangre), 6,4 nm; grosor de la membrana celular: 7,5 nm. En la Figura 7.1 se muestran ejemplos de biomoléculas.

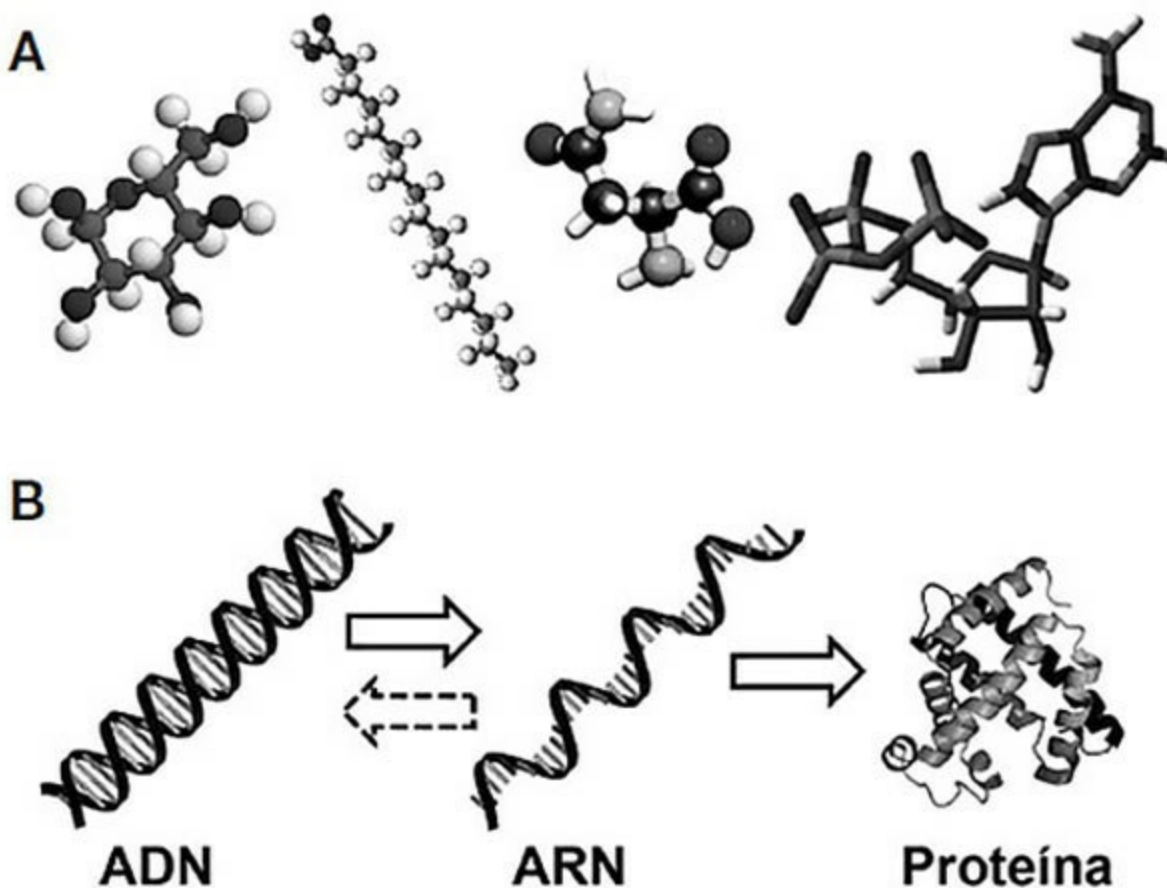


FIGURA 7.1. A. Ejemplos de moléculas biológicas: un azúcar (glucosa), un ácido graso (ácido palmítico), un aminoácido (alanina) y un nucleótido (adenosín trifosfato o ATP). B. Esquema del flujo de información genética en los seres vivos: el paso de ADN a ARN se denomina transcripción, y el de ARN a proteínas traducción; algunos virus (denominados «retrovirus») son capaces de realizar una retrotranscripción de ARN a ADN.

Proteínas y ácidos nucleicos son las macromoléculas fundamentales y más características de la vida. Las proteínas pueden desempeñar diferentes funciones, entre

ellas catalizar reacciones metabólicas (las denominadas «enzimas»), actuar como transportadores específicos a través de la membrana celular, servir de almacén estructural en la célula, unirse a azúcares o lípidos, o formar distintos tipos de agregados macromoleculares con los ácidos nucleicos. Por su parte, los ácidos nucleicos son los biopolímeros que se encargan de almacenar y transmitir la información hereditaria de los seres vivos, ya que constituyen su genoma, es decir, el conjunto de la información genética que posee una especie. Los genomas de todos los organismos celulares son de ADN de cadena doble (dsADN), mientras que en el caso de los virus, de los que hablaremos en el apartado 7.4, sus genomas pueden ser de ADN o de ARN, y tanto de cadena doble (dsADN y dsARN) como sencilla (ssADN y ssARN). La investigación en biología molecular ha permitido demostrar que el flujo de información genética entre las macromoléculas fundamentales de la vida sigue el esquema $ADN \leftrightarrow ARN \rightarrow proteína$ (Figura 7.1B).

7.3. Donde el microscopio no llega

Durante mucho tiempo se sospechó que muchos fenómenos naturales y artificiales estaban producidos por algún tipo de criaturas vivas desconocidas, que resultaban demasiado pequeñas como para ser observadas a simple vista (los humanos no podemos ver objetos que midan menos de unos 50 μm , aproximadamente el grosor de un cabello) o incluso utilizando una lupa. Algunos de esos procesos eran muy útiles para la humanidad, como la fermentación del pan o la cerveza (llevada a cabo por ciertas levaduras) y otros eran tan destructivos como la lepra o la peste (producidas, respectivamente, por las bacterias *Mycobacterium leprae* y *Yersinia pestis*). Tales microorganismos misteriosos pudieron observarse por primera vez a finales del siglo XVI, con la invención del microscopio de manera casi simultánea por G. Galilei en Italia y Z. Janssen en Holanda. Los primeros microscopios eran instrumentos muy simples formados por un par de lentes alineadas, una cercana al objeto que se pretendía observar (llamada por ello «objetivo») y otra cercana al ojo del observador (el «ocular»), separadas entre sí por un tubo hueco de unos 8 o 10 cm. Con ellos era posible aumentar la imagen hasta unas 200 veces, aunque debido a lo rudimentario del proceso de fabricación y al mal pulido de las lentes, lo que se observaba aparecía generalmente borroso y poco definido.

Las primeras observaciones relevantes al microscopio se hicieron más de medio siglo después de su invención, cuando en 1664 R. Hooke observó una fina lámina de

corcho y comprobó que era un material poroso formado por cajas o celdillas, para las que acuñó un nombre que pasaría a la historia: «células». Unos años más tarde, el biólogo M. Malpighi observó por primera vez al microscopio células vivas (de entre 10 y 20 μm de tamaño) formando parte de tejidos de animales y plantas. Más tarde, A. van Leeuwenhoek perfeccionó el dispositivo usando lentes más pequeñas y potentes, construidas con vidrio de mayor calidad y mucho mejor pulidas. Gracias a los casi 500 aumentos de su microscopio, alrededor del año 1676 logró observar por primera vez la gran cantidad de microorganismos, con colores y morfologías diferentes, que contenía el agua estancada. Además, quien hoy consideramos como padre de la microbiología dibujó con mucho cuidado lo que él llamaba «diminutos animáculos», y en 1683 llegó a observar incluso bacterias (cuyo tamaño es de entre 1 y 2 μm). A lo largo del siglo XVIII los microscopios se fueron perfeccionando en sus partes mecánicas, lo que permitió un aumento en su estabilidad y facilidad de uso.

Las mejoras relevantes en la óptica del microscopio se produjeron cuando en 1877 el físico E. K. Abbe publicó su teoría del microscopio y además mejoró la microscopía de inmersión tal como le había encargado el óptico y fabricante de microscopios C. Zeiss. Así, sustituyendo el agua por aceite de cedro se aumentaba el índice de refracción del medio de 1,33 a 1,5, lo que permitía lograr unos 1000 aumentos. Con ello era posible observar las bacterias con detalle (Figura 7.2A), y también distinguir el núcleo y orgánulos de las células de animales o plantas. En los años veinte casi se había alcanzado el límite teórico de aumento para los microscopios ópticos y se habían desarrollado distintos tipos de iluminación para resaltar el contraste de la muestra. No obstante, era evidente que la vida estaba constituida por componentes de tamaños menores, que era necesario observar y estudiar.

La siguiente revolución se produjo en los primeros años treinta, cuando los físicos E. Ruska y M. Knoll construyeron el primer microscopio electrónico. En él se hacía llegar a la muestra un haz de electrones en lugar de luz visible, con lo que se abría la posibilidad de observar estructuras intracelulares muy pequeñas, y microorganismos de distinto tipo incluyendo los virus. Eso sí, al no utilizar luz visible en realidad se dejaba de «ver» realmente el espécimen, y la imagen producida se debía a la reconstrucción de las señales producidas por la interacción de los electrones con la materia. Con ello, evidentemente, se perdía la información sobre el color de la muestra. No obstante, en ocasiones las imágenes en blanco y negro obtenidas por microscopía electrónica se representan con falsos colores para indicar las diferentes alturas de la muestra, realzar su contraste, o bien resaltar ciertas partes del objeto observado. Hoy en día, las microscopías electrónicas de transmisión (TEM) y de barrido (SEM, Figura 7.2B), descritas en el Capítulo 3, poseen una enorme potencia, por lo que permiten visualizar

estructuras moleculares de dimensiones nanométricas como proteínas o ácidos nucleicos, e incluso átomos.

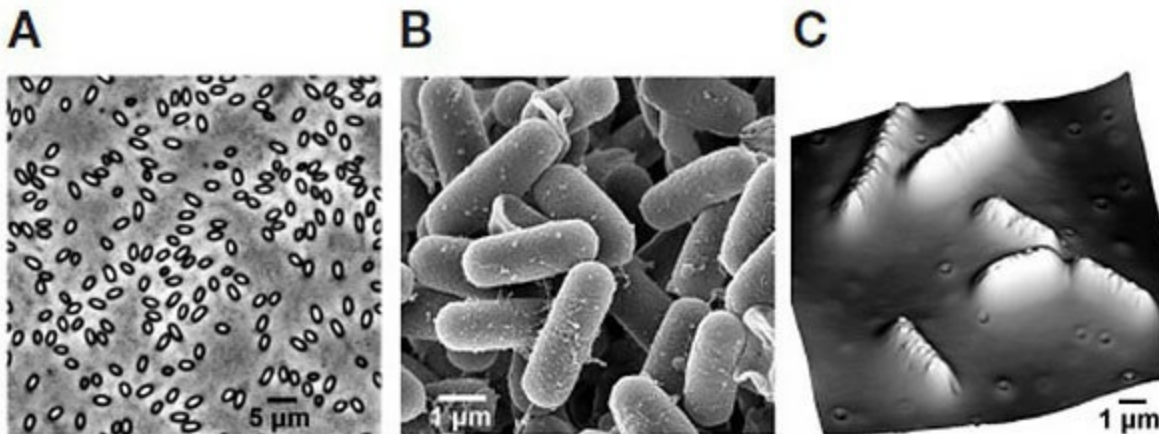


FIGURA 7.2. Imágenes de bacterias del género *Bacillus* observadas con un microscopio óptico (A), SEM (B) y AFM (C). Imágenes tomadas por A. I. López-Archilla (Universidad Autónoma de Madrid), M. Madhaiyan (Universidad Nacional Chungbuk, Corea del Sur) y E. López-Camacho (Centro de Astrobiología, CSIC-INTA).

No obstante, la microscopía electrónica posee una limitación fundamental en el ámbito de la biología: dado que la muestra observada no puede contener agua líquida, resulta imposible ver células vivas, y tampoco estructuras moleculares en disolución. Otra limitación es el hecho de que la materia orgánica, y en especial la biológica, se degrada rápidamente bajo la acción de los electrones. Además, dado que los haces de electrones tienen escaso poder de penetración, si se desea visualizar por microscopía TEM los componentes celulares, incluso una célula aislada es demasiado gruesa, y es preciso cortarla en láminas ultrafinas de unos 20-60 nm de espesor. Cuando usamos la microscopía TEM, para obtener suficiente contraste, las preparaciones se han de «teñir» previamente con compuestos que poseen átomos pesados (por ejemplo, sales de uranio, plomo o lantano). En el caso del SEM, el espécimen cuya superficie se desea observar ha de ser recubierto con una capa delgada de un material metálico, como el oro. No obstante, a pesar de estas limitaciones, los nuevos avances que se están incorporando tanto en la tecnología como en el procesamiento de las imágenes permiten predecir un largo y exitoso futuro de las microscopías electrónicas para estudiar los componentes de los seres vivos.

En cualquier caso, las microscopías electrónicas convencionales poseen un límite de resolución en el rango de los nanómetros a partir del cual no resultan útiles. Para estudiar los nanobjetos, que como estamos viendo son los protagonistas moleculares del mundo vivo, se han desarrollado algunas modificaciones experimentales de la microscopía electrónica, y además se han ideado tecnologías totalmente diferentes. Entre ellas están la difracción de rayos X, la resonancia magnética nuclear, los nuevos

tipos de microscopía de campo cercano (STM y AFM, Figura 7.2 C), y otros sorprendentes avances experimentales, algunos de los cuales se han descrito en capítulos anteriores de este libro.

7.4. Virus y ribosomas: dos tipos de nanomáquinas naturales

Además de las células y los organismos pluricelulares formados por ellas, en la naturaleza existen otros tipos de «entidades replicativas» sobre las que (como veremos en el apartado 7.7) existe un debate científico acerca de si son seres vivos o no: los viroides y los virus. Los viroides son moléculas de ARN circular y «desnudo» (sin ningún tipo de cobertura proteica), de entre 240 y 400 nucleótidos de longitud, que infectan numerosas especies de plantas y pueden producirles enfermedades. Desde el punto de vista tecnológico, se ha propuesto que moléculas de este tipo podrían ser utilizadas como herramientas para inducir distintos tipos de respuestas en plantas, tanto per se como unidas a algún tipo de nanoestructura.

Por su parte, los virus son parásitos capaces de infectar a todas las especies celulares conocidas, y están formados por tres componentes principales: a) un genoma, que como se indicaba en el apartado 7.2 puede ser de ADN o de ARN; b) una cápsula o «cápsida» formada por proteínas, que protege al genoma; y c) en algunas familias virales, una membrana lipídica que ha sido «robada» a la última célula que han infectado. Los virus con genoma de ARN (como el de la gripe, el del sida o el del Ébola) evolucionan mucho más rápidamente que los que tienen genoma de ADN (como el de la varicela, el papiloma o el herpes) debido a que las enzimas que copian su genoma producen más errores o mutaciones. Por ello, estos virus generan rápidamente mutantes resistentes a los fármacos y es mucho más difícil luchar contra ellos cuando nos infectan. La existencia de los virus ya fue intuita por L. Pasteur a mediados del siglo XIX, cuando no pudo encontrar el microorganismo que producía una enfermedad entonces mortal, la rabia, y propuso que debería ser una entidad patógena diferente a los «microbios» o «toxinas» entonces conocidos: bacterias, hongos y protozoos. Además, el patógeno causante de la rabia debía ser muy pequeño, ya que era imposible observarlo al microscopio óptico. Por tanto se estaba luchando contra un enemigo invisible, hoy sabemos que de dimensiones nanométricas.

Los primeros virus fueron descubiertos a finales del siglo XIX, aunque hubo que esperar hasta la aparición de la microscopía electrónica para comenzar a visualizarlos, y con ello estudiar sus variadas morfologías y diferentes procesos de infección en las

células. El uso de TEM y SEM, junto con otras técnicas estructurales como la difracción de rayos X, ha mostrado que el tamaño típico de los virus es de entre 20 y 300 nm (es decir, aproximadamente entre 3 y 50 veces más pequeños que las bacterias), si bien hay algunas excepciones de dimensiones mayores. Las morfologías de los virus son muy variadas. En la Figura 7.3 se muestran esquemas de la estructura de diversos virus, y algunas imágenes obtenidas por microscopía electrónica.

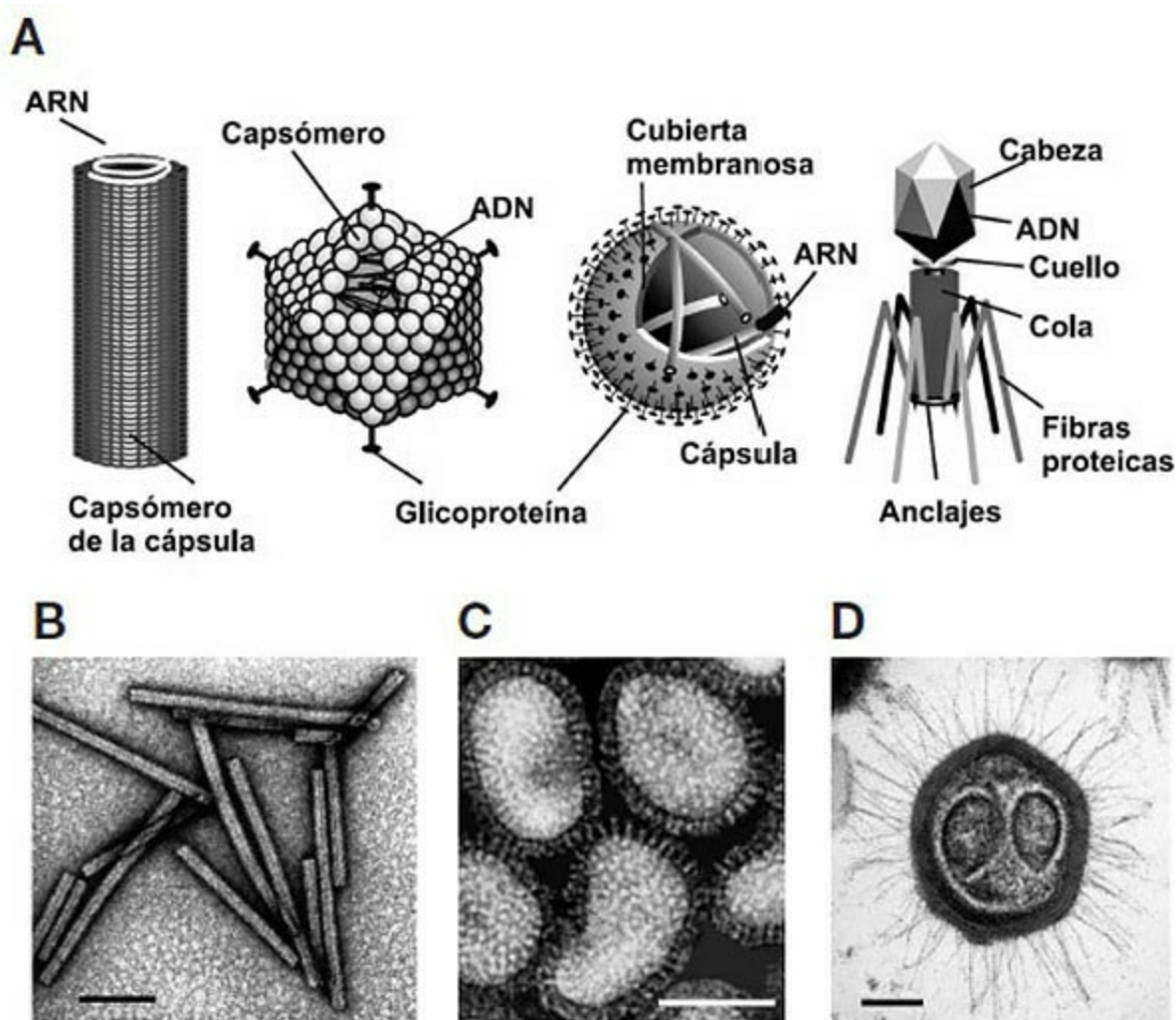


FIGURA 7.3. A. Representación esquemática de la estructura y componentes de distintos virus: helicoidal, icosaédrico, esférico, y un bacteriófago que infecta a bacterias. B. Imágenes TEM de tres especies de virus: el virus del mosaico del tabaco, el virus de la gripe, y el mimivirus (uno de los de mayor tamaño conocido). En los tres casos, la barra indica 100 nm. Procedencia de las figuras de TEM: B, H.-W. Ackermann (Universidad de Laval, Quebec, Canadá); C, L. Stannard (Universidad de Ciudad del Cabo, República de Sudáfrica); D, D. Raoult (Universidad del Mediterráneo, Francia).

Durante las últimas décadas también se han ido desvelando los mecanismos que emplean muchos de los virus conocidos para infectar a las células y poner a su servicio parte de la maquinaria replicativa y metabólica celular. Los ciclos infectivos virales siguen estrategias diferentes, unas muy simples y otras más complicadas, unas rápidas y

otras lentas, pero siempre obedecen a un esquema común: el virus reconoce su célula diana, entra en ella («la infecta»), se replica (produciendo mutaciones durante el proceso) en su interior, y su progenie sale (unas veces rompiendo la membrana celular y otras no) para infectar más células y continuar el ciclo hasta que no queden hospedadores disponibles. Por tanto, los virus son estructuras nanométricas capaces de infectar células y replicarse en ellas generando formas mutantes durante el proceso: son nanomáquinas que evolucionan. Este hecho los ha convertido en herramientas óptimas para ser utilizados en medicina, y más recientemente en aplicaciones nanobiotecnológicas.

Así, los virus o ciertas partes de ellos se han empleado por su potencial para fabricar vacunas que nos permiten prevenir las infecciones producidas por esos mismos virus o por otros similares. En la elaboración de vacunas obtenidas por ingeniería genética a partir de virus se suele emplear alguna de las proteínas de la cápsida o fragmentos de ellas, o bien el virus completo debidamente inactivado o «modificado» para que carezca de potencial replicativo y no produzca enfermedades en el paciente tratado. Otra aplicación médica relevante de los virus es aprovechar lo que la evolución ha puesto en nuestras manos: un enorme repertorio de nanomáquinas altamente especializadas, capaces de llegar a células concretas, entrar en ellas y destruirlas. En el apartado 7.5 se muestra cómo, para el desarrollo de algunas de las aplicaciones terapéuticas de los virus, sus propiedades mecánicas (rigidez y/o morfología de la cápsida) han de ser estudiadas en detalle, mediante una combinación de técnicas genéticas y nanotecnológicas. Por otra parte, como se describe en el apartado 7.10, se están diseñando virus modificados para que funcionen como nanodispensadores de fármacos en el organismo.

Además de los virus, existen muchas otras «nanomáquinas naturales» trabajando activamente en el interior de la célula. Entre ellas, quizá las más complejas e importantes son los ribosomas, responsables de traducir la información genética (el paso ARN→proteína): el ribosoma lee los nucleótidos del «ARN mensajero», y por cada tres de ellos une un aminoácido concreto a la proteína que se está sintetizando. Las reglas para traducir todos los posibles tripletes de cuatro nucleótidos del ARN (la combinatoria nos dice que son $4^3 = 64$) a los 20 aminoácidos que forman las proteínas vienen fijadas en un diccionario común a todos los seres vivos: el denominado «código genético». Los ribosomas son partículas ribonucleoproteicas (es decir, formadas por ARN y proteínas) que existen en todos los tipos celulares de todas las especies. Tienen una forma redondeada sin simetría interna, un diámetro de entre 25 y 30 nm, y están constituidos por dos subunidades de diferente tamaño.

A lo largo del último medio siglo se ha utilizado un gran número de técnicas con

objeto de profundizar en la estructura global del ribosoma, y con ello llegar a comprender el mecanismo de la traducción. Los dos métodos experimentales más empleados han sido la difracción de rayos X a partir de cristales de ribosomas, y la criomicroscopía electrónica seguida de reconstrucción tridimensional de imágenes. Con ello, durante los últimos quince años se han obtenido imágenes cristalográficas con una resolución de entre 0,1 y 0,2 nm, como se muestra en la Figura 7.4. Además, el uso combinado de varias técnicas estructurales ha permitido estudiar el movimiento coordinado de los componentes de estas complejas «nanofactorías de proteínas» durante el proceso de traducción.

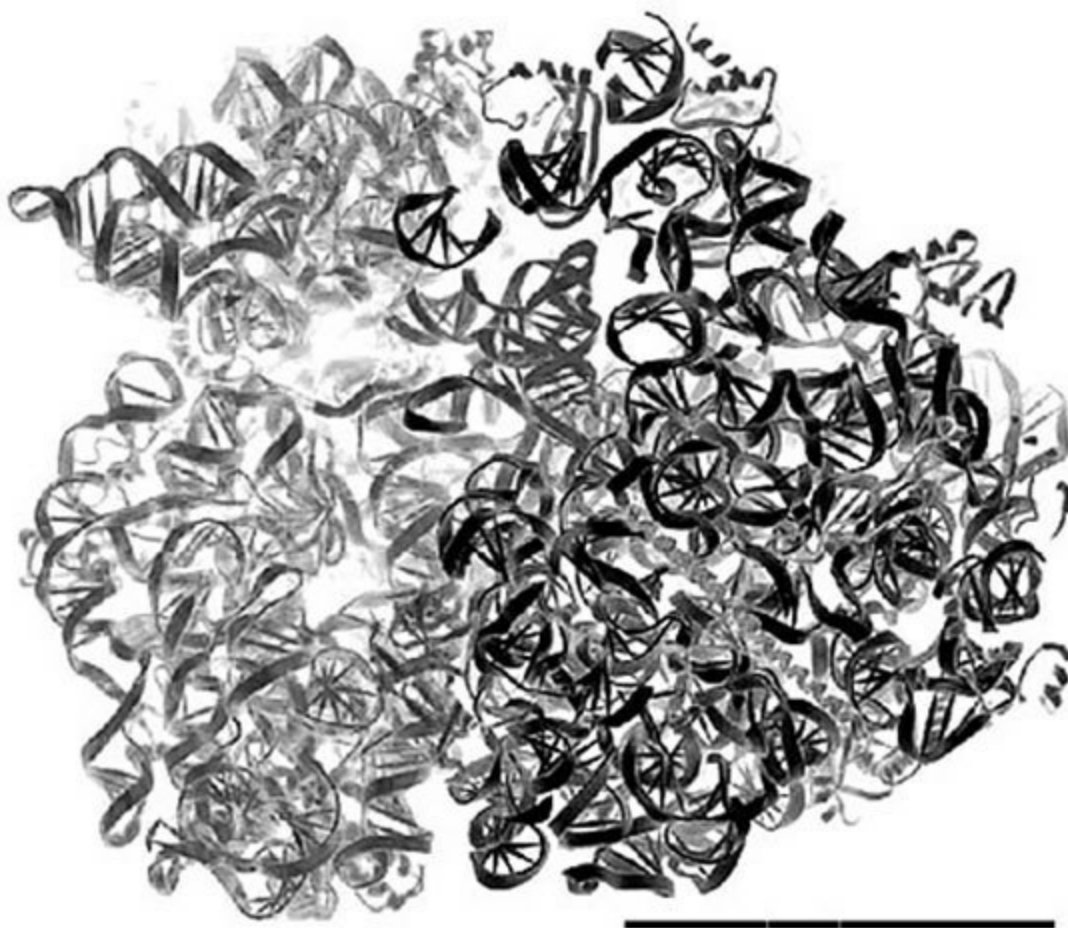


FIGURA 7.4. Estructura cristalográfica de alta resolución de un ribosoma bacteriano durante la traducción del ARN mensajero. Se observan las subunidades ribosomales menor (izquierda, gris claro) y mayor (derecha, gris oscuro). El ARN mensajero se muestra como una cinta en la zona de interacción entre ambas subunidades, y la proteína que está siendo traducida corresponde a la hélice recta que avanza a través de la subunidad mayor hacia la parte inferior derecha de la figura. La barra corresponde a 10 nm. Imagen obtenida por el grupo de A. E. Yonath (Instituto Weizmann de Ciencias, Israel).

Otros ejemplos de nanomáquinas moleculares presentes en la célula (formadas principalmente por proteínas) son el replisoma (complejo de replicación del ADN), el complejo de transcripción del ADN a ARN, o el proteosoma (cuya función es la

degradación controlada de proteínas). Todos ellos se están estudiando en profundidad desde hace décadas, y de su funcionamiento podrán extraerse claves para el diseño u optimización de diferentes nanomáquinas artificiales.

7.5. Manipulando biomoléculas individuales

Cada vez conocemos mejor los nanocomponentes del mundo vivo y sus interacciones. Además, los avances de la nanotecnología nos permiten hoy en día manejar biomoléculas *de una en una* para moverlas de un lugar a otro, entender cómo funcionan y qué tipo de contactos establecen entre sí. Esta posibilidad abre campos de investigación totalmente nuevos, ya que hasta hace pocos años los avances en biología molecular y biotecnología requerían el trabajo simultáneo con *todas las biomoléculas* presentes en una muestra compleja (como puede ser un fluido biológico) o pura (una preparación de laboratorio de un único tipo de moléculas, por ejemplo una proteína). Con ello, se manejaban simultáneamente muchos billones de moléculas (diferentes o iguales) y por tanto lo estudiado era el comportamiento promedio de las mismas. Por el contrario, ahora ya es posible tomar una única molécula aislada (por ejemplo, una proteína o una cadena corta de ADN), un solo agregado macromolecular (por ejemplo un ribosoma), o un único virus entre los miles de millones que se producen cada día en un paciente infectado. Así, la nanotecnología permite estudiar el comportamiento de dicha entidad biológica individual y medir su respuesta frente a diversos estímulos.

Entre los sistemas desarrollados para manipular moléculas biológicas individuales, varios de ellos requieren la funcionalización previa de la biomolécula con otro tipo de molécula o con una nanoestructura artificial, como un nanotubo de carbono o una nanopartícula. Así, por ejemplo, si se une una nanopartícula a una cadena corta de ácido nucleico o a una proteína (gracias a la interacción con ambos de otra pequeña molécula que actúa como «puente»), el mayor tamaño y estabilidad de la nanopartícula permite manipular con más facilidad la biomolécula unida a ella dentro de la disolución que la contiene. Una de las formas más desarrolladas para mover y manipular biomoléculas individuales funcionalizadas con nanopartículas consiste en el empleo de un instrumento denominado «pinzas ópticas», también conocido como «trampa óptica». Este sistema, puesto a punto por A. Ashkin en los Laboratorios Bell en 1970, se basa en que un rayo láser altamente focalizado es capaz de atrapar y mover partículas dieléctricas (es decir, no conductoras de la electricidad) sin necesidad de «tocarlas» físicamente (Figura 7.5A).

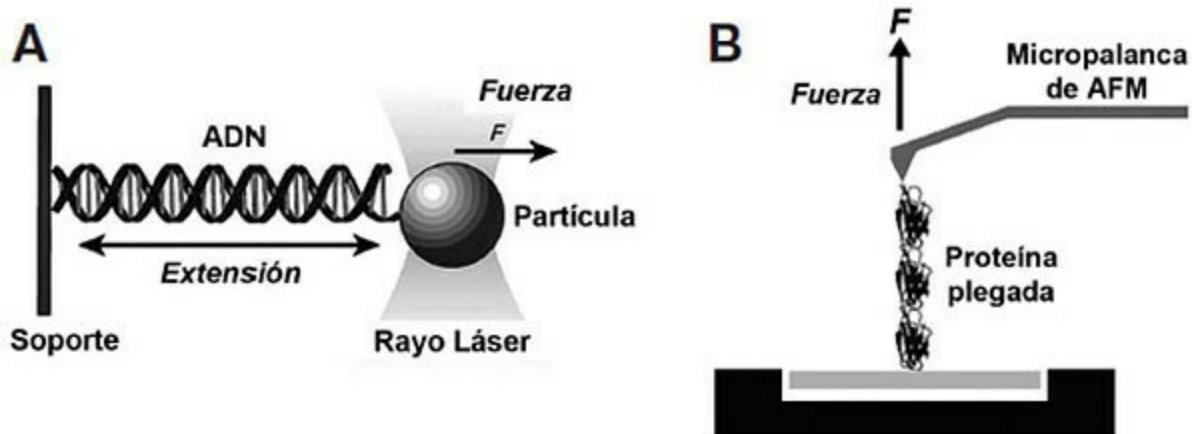


FIGURA 7.5. Tecnologías para manipular biomoléculas individuales. A. Pinzas ópticas. B. AFM.

La alta sensibilidad de las pinzas ópticas permite realizar desplazamientos y rotaciones subnanométricos en objetos de tamaño comprendido entre aproximadamente 10 nm y 10 μm (entre ellos moléculas individuales, agregados macromoleculares, virus, orgánulos celulares o células completas), y cuantificar fuerzas muy pequeñas, en el rango del piconewton. Por tanto, este sistema permite investigar un gran número de procesos bioquímicos y biofísicos, estudiar las propiedades mecánicas de los biopolímeros y caracterizar el funcionamiento de las diferentes nanomáquinas y nanomotores moleculares que trabajan en el interior de las células.

Las pinzas ópticas se utilizan, por ejemplo, para estudiar las características mecánicas de los virus y de algunos de sus componentes. Entre ellos se ha investigado en profundidad el virus bacteriófago llamado Phi29, que infecta a la bacteria *Bacillus subtilis*. El genoma de este virus es una molécula de ADN de doble banda (ds ADN) de unos 19 300 pares de nucleótidos, cuya longitud es de aproximadamente 6,5 μm , es decir, casi siete veces más larga que la célula a la que infecta. Sin embargo, ese ADN está empaquetado en una cápsida viral, de forma icosaédrica, cuyo volumen es de solo 0,06 μm^3 . Al final del proceso infectivo, antes de salir de la célula y quedar listo para infectar a la siguiente, el virus Phi29 debe empaquetar su largo genoma en esa diminuta cápsida. Para ello resulta necesario que disponga de algún tipo de motor capaz de «tirar» de su ADN y empujarlo dentro de la cápsida. Dicho bionanomotor se localiza en el cuello o conector del virus (ver Figura 7.3A), y durante los últimos años se ha caracterizado a escala molecular: está formado por una serie de proteínas y moléculas de ARN que cambian coordinadamente de forma para realizar una fuerza que se traduce en un esfuerzo de tracción sobre el ADN viral hacia el interior de la cápsida (Figura 7.6).

Para conocer los detalles del funcionamiento de ese nanomotor y medir su potencia, C. Bustamante y su grupo de investigación en la Universidad de California en Berkeley

(EE.UU.) lograron unir la molécula de ADN genómico de un Phi29 a una nanopartícula que podían sujetar mediante pinzas ópticas. El nanomotor del virus tiraba de un extremo de la molécula de ADN para introducirla en su cápsida (previamente inmovilizada a un soporte), y a la vez los investigadores tiraban de la nanopartícula unida al otro extremo. En expresión del propio Bustamante, era «como tirar de la cola de un gato que quería escaparse». Con ello se pudo determinar que el nanomotor de Phi29 realizaba una fuerza de aproximadamente 70 piconewtons para empaquetar su genoma. Aunque este número es muy pequeño en valor absoluto, en proporción al tamaño del virus equivale a una fuerza inmensa: si lo escaláramos a las dimensiones habituales en las máquinas construidas por los humanos, ese motor sería capaz de arrastrar seis aviones de carga. Entre las numerosas aplicaciones adicionales de las pinzas ópticas, es destacable su empleo para estudiar distintos aspectos relacionados con la dinámica de replicación del ADN, un campo en el que trabaja activamente el Centro Nacional de Biotecnología del CSIC en Madrid.

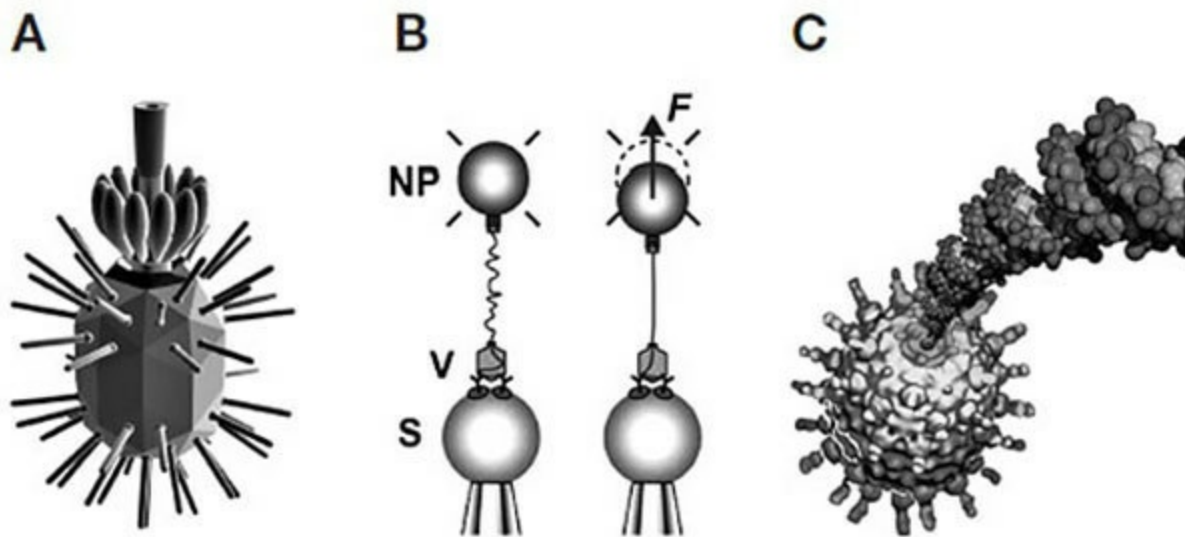


FIGURA 7.6. A. Recreación informática de la cápsida del bacteriófago Phi29, mostrando su nanomotor en el cuello del virus. B. Esquema del experimento realizado con pinzas ópticas para determinar la fuerza del nanomotor: S, soporte; V, virus; NP, nanopartícula; F , fuerza aplicada. C. Representación gráfica del nanomotor del virus empaquetando su genoma. Procedencia de las imágenes: A, K. Radcliffe y N. Stonehouse (Universidad de Leeds, Reino Unido); B y C, C. Bustamante (Universidad de Berkeley, California, Estados Unidos).

En paralelo al uso de pinzas ópticas, otro desarrollo nanotecnológico para manipular biomoléculas y complejos macromoleculares individualmente ha consistido en modificar la tecnología de AFM de forma que en la punta de la palanca se una (directamente, o a través de otra molécula que actúa como puente) uno de los extremos de la biomolécula estudiada. Con ello se dispone de una especie de «caña de pescar» (la micropalanca de AFM) provista de un «nanoanzuelo» (la punta de la palanca) en el

que se ha unido un «nаноcebo» (por ejemplo una proteína o un fragmento de ADN). Siguiendo con la metáfora, podemos «pescar» en una muestra biológica o solución donde exista la «presa» deseada (una molécula con afinidad por nuestro cebo) y medir la fuerza con la que debemos tirar de ella para capturarla. También se puede inmovilizar sobre un soporte el nanocebo por el extremo no unido al anzuelo y estudiar cómo cambia su estructura cuando tiramos de la caña. Con esta última variante se ha logrado, por ejemplo, cuantificar la fuerza necesaria para desplegar los distintos dominios estructurales en los que se organizan ciertas proteínas (Figura 7.5B). También se ha utilizado con éxito para estirar, comprimir, doblar, desenrollar o «superenrollar» (es decir, enrollar aún más) cadenas sencillas o dobles de ADN y de ARN, así como para hibridar y deshibridar de manera controlada las dos hebras complementarias de una doble hélice de ADN. La medida de la fuerza en cada caso nos informa sobre la elasticidad de las biomoléculas, y sobre el tipo de enlaces que mantienen su nanoestructura funcional.

La tecnología de AFM se está empleando también para profundizar en el conocimiento de la estructura de las partículas virales, y para estudiar sus características físicas como elasticidad y resistencia mecánica. En esta variante de la técnica, que se conoce como «espectroscopía de fuerzas», se presiona sobre la muestra (la cápsida del virus) con la punta de la micropalanca y se cuantifica la fuerza requerida para deformarla, aplastarla o romperla. Como ejemplo, investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid y del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CSIC-UAM) están estudiando el papel que desempeña el genoma de ADN del llamado «virus diminuto del ratón» en el mantenimiento de la estructura de la partícula viral. Para ello se analizan por separado partículas virales completas y cápsidas vacías, tanto en su variante natural como en el caso de que la cápsida esté constituida por proteínas del virus con determinadas mutaciones.

En el ámbito de la nanofluídica también se está trabajando con virus como sistemas modelo. Un buen ejemplo lo proporciona el virus del mosaico del tabaco, que tiene simetría helicoidal y forma de nanotubo con unos 300 nm de longitud, 18 nm de diámetro externo y 4 nm de diámetro interno (ver Figura 7.3B). Por tanto, constituye un modelo valioso para estudiar cómo fluyen los líquidos en tubos con diámetros menores de 30 nm, un límite a partir del cual se sabe muy poco sobre su comportamiento hidrodinámico y acerca de los métodos necesarios para lograr el confinamiento del fluido. Así, combinando estos nanotubos naturales con sistemas de micro— y nanofluídica, investigadores del CIC-Nanogune de San Sebastián están estudiando la difusión de iones metálicos (de hierro y níquel) y la migración de nanopartículas de oro por su interior, lo que se promueve depositando nanogotas mediante AFM en ambos

extremos del virus.

7.6. El ADN como nanobiomaterial

Los ácidos nucleicos, debido a sus características estructurales, pueden ser utilizados como materiales muy útiles en bionanotecnología, en particular para construir distintos tipos de nanoestructuras. El ADN es una molécula polimérica formada por monómeros denominados desoxirribonucleótidos, cada uno de los cuales consta del azúcar desoxirribosa, un grupo fosfato, y una base nitrogenada (también llamada simplemente «base») que puede ser de cuatro tipos: adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). En el otro ácido nucleico natural, el ARN, sus monómeros son ribonucleótidos formados por ribosa, el grupo fosfato, y cuatro tipos de bases: A, G, C y uracilo (U). La secuencia de bases de una molécula de ADN (por ejemplo, GATTACATACATACAAAG) constituye su mensaje genético. Por tanto, la información heredable almacenada en los genomas es la secuencia de sus nucleótidos: una larga «palabra» formada por miles de «letras» en los virus (por ejemplo, el de la hepatitis B tiene un genoma de ADN muy pequeño, con 3200 nucleótidos), millones en las bacterias (el ADN genómico de *Escherichia coli* posee 4 600 000 nucleótidos), o hasta miles de millones en las plantas y animales (el genoma de *Homo sapiens* es un largo texto con aproximadamente 3 300 000 000 letras).

Las técnicas de secuenciación o «lectura» de ácidos nucleicos, iniciadas en los años setenta, se basaban en la posibilidad de romper controladamente el ADN en ciertas posiciones, o bien en realizar la copia de una hebra forzando al sistema para que se detuviera en una posición concreta al introducir un «dideoxinucleótido terminador». El gran desarrollo y automatización del segundo de estos métodos permitió abordar distintos proyectos de secuenciación de genomas completos durante los años noventa. Así, por ejemplo utilizando esta técnica en decenas de laboratorios simultáneamente, el genoma de nuestra especie se completó casi en su totalidad en el año 2001. Continuando el progreso tecnológico, desde 2005 se dispone de sistemas de nueva generación para secuenciar ADN, con los cuales se ha logrado un enorme aumento en la velocidad de secuenciación y una reducción del coste por nucleótido secuenciado. En estos métodos la aportación de la nanotecnología ha sido fundamental para miniaturizar los dispositivos o compartimentos en los que se produce la reacción de secuenciación.

Como un paso más en esta carrera, los avances de la nanotecnología para manipular biomoléculas individuales (descritos en el apartado anterior) han originado sistemas «de tercera generación» con los que es posible secuenciar moléculas de ADN *una a*

una. Así, la empresa británica Nanopore Technologies ha puesto en el mercado una plataforma que ofrece la posibilidad de secuenciar moléculas individuales de ADN (y también ARN o proteínas) analizando las alteraciones que se van produciendo en la diferencia de potencial eléctrico a uno y otro lado de una membrana artificial en la que se ha insertado un nanoporo formado por proteínas. El paso secuencial de los monómeros (los nucleótidos del ADN o ARN, o bien los aminoácidos de la proteína) a través de ese poro produce cambios de potencial transmembrana característicos para cada monómero, con lo que se va averiguando la secuencia de la molécula. El proceso está totalmente automatizado, y acoplado a los programas bioinformáticos que permiten interpretar el resultado de la secuenciación. En un desarrollo más reciente de este sistema se está investigando el uso de nanoporos formados por grafeno o por nitruro de silicio. Una característica relevante de los métodos de tercera generación es que permiten, por primera vez en la historia, secuenciar cualquier molécula de ADN sin que se requiera su amplificación previa utilizando métodos enzimáticos. Una nueva revolución en el campo de la genómica está servida.

En cuanto a su estructura, el ADN es una doble hélice formada por dos cadenas de nucleótidos cuyas bases nitrogenadas están orientadas hacia el eje de la hélice e interaccionan entre sí mediante puentes de hidrógeno. La interacción que se establece entre las bases obedece a la complementariedad A-T (cuando hay una A en una cadena, en la otra hay una T) y G-C. En su conformación más habitual el diámetro del ADN es de 2 nm, y la distancia entre los planos ocupados por dos bases consecutivas es de 0,34 nm. Dado que en cada vuelta completa de la doble hélice hay exactamente 10 nucleótidos, su «paso de rosca» es de 3,4 nm (Figura 7.7). El descubrimiento de la estructura y dimensiones del ADN se basó en las equivalencias de bases observadas por E. Chargaff, en los datos de difracción de rayos X obtenidos por R. Franklin y M. Wilkins, y en la síntesis de todas las evidencias experimentales que realizaron J. Watson y F. Crick en 1953.

La rigidez del ADN se ha podido estudiar recientemente empleando espectroscopía de fuerzas, una variante del AFM descrita en el apartado anterior. Así, se ha determinado que la longitud máxima que tiende a mantenerse extendida, sin plegarse o doblarse, es de aproximadamente 50 nm para el dsADN (lo que supone unos 150 nucleótidos) mientras que se reduce a 5 nm (15 nucleótidos) para el ssADN. Precisamente este último valor equivale a la longitud óptima de los oligonucleótidos de ssADN utilizados como sondas en microarrays y otros biosensores (ver apartado 7.8), pues previamente se había comprobado que el ADN de más de 18 nucleótidos tiene mayor tendencia a plegarse sobre sí mismo (lo que además se favorece si existen regiones con nucleótidos complementarios en su secuencia) y a no interaccionar

correctamente con su ADN diana.

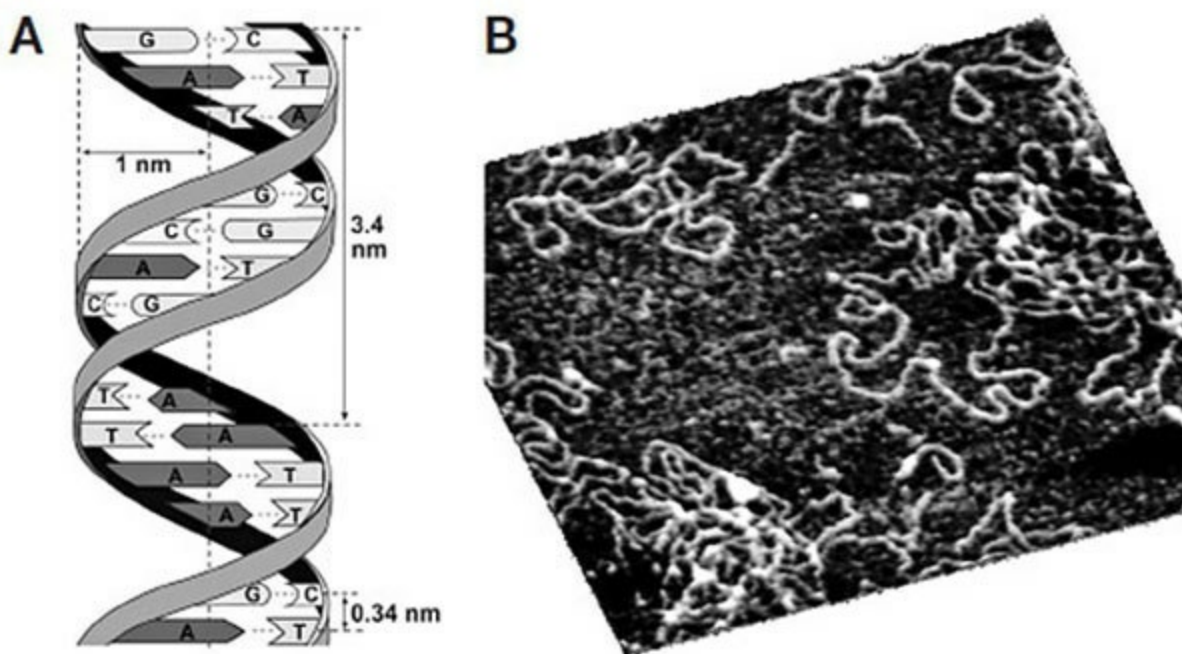


FIGURA 7.7. A. Dimensiones típicas de la doble hélice de ADN. B. Moléculas de dsADN visualizadas por AFM. Gentileza de R. M. Jáudenes y A. García-Sacristán (Centro de Astrobiología, CSIC-INTA).

En cuanto a su capacidad para almacenar información el ADN es un material extraordinario, con una densidad de información mucho mayor que la de los DVDs, discos duros y otros sistemas actualmente en uso (como comprobaremos en el siguiente párrafo). Además, el ADN resulta estable durante milenios (o incluso millones de años si las moléculas son cortas y sus condiciones de preservación han sido óptimas), y su información puede ser leída aunque las cadenas estén dañada. A diferencia de los sistemas informáticos ideados por los humanos, el hardware para la lectura del ADN, formado por nucleótidos y enzimas, lleva miles de millones de años funcionando adecuadamente sin requerir ningún tipo de «actualización» o cambio de versión, y es totalmente compatible con cualquier «texto» de ADN.

Para demostrar la utilidad del ADN como sistema de almacenaje de información, investigadores de la Universidad de Harvard (EE. UU.) han codificado recientemente en forma de 55 000 oligonucleótidos (es decir, moléculas cortas de ADN) un libro formado por 53 426 palabras y 11 imágenes, y han sido capaces de leer sin problema dicha información. El libro había sido digitalizado en paquetes de 96 bits, convirtiendo cada dígito 0 en el nucleótido A o C, y los 1 en G o T. Con ello, se sintetizaron oligonucleótidos con 96 nucleótidos de datos, flanqueados por las secuencias necesarias para su amplificación enzimática *in vitro*, y para incluir una especie de «código de barras» que indicaba la posición de ese fragmento de información dentro

del texto. Así, el libro entero cabe en una gota de disolución, y puede ser leído con la tecnología de amplificación y secuenciación disponible en cualquier laboratorio de biología molecular. Los investigadores han sido capaces de ensamblar y decodificar la información, y al compararla con el texto original han encontrado solo diez errores en sus 5,27 millones de bits. Además, este trabajo ha mostrado que un polímero tridimensional como el ADN puede empaquetar información con densidades cercanas a 10^{16} bits/mm³ frente a los aproximadamente 10^6 bits/mm³ de un soporte bidimensional como el DVD. Sin duda, las aplicaciones de este nanosistema biológico de almacenamiento de información pueden ser espectaculares.

Por otra parte, desde el punto de vista de su carga eléctrica la presencia de grupos fosfato a lo largo de la cadena de ADN le confiere una carga neta negativa a pH neutro. Por ello, muchos investigadores se han preguntado si la molécula de ADN podría ser utilizada como un conductor eléctrico. La nanotecnología está ayudando notablemente en este sentido, aunque los resultados obtenidos hasta la fecha son controvertidos. Así, algunos experimentos de AFM con una punta conductora han mostrado que la cadena sencilla no conduce la corriente eléctrica, mientras que la doble hélice sí lo hace. Sin embargo, otros resultados experimentales y ciertos cálculos teóricos cuestionan estas deducciones y proponen que el ADN no es conductor de la electricidad en ningún caso. Por tanto, en la actualidad aún no hay consenso sobre si será posible disponer de nanocables de ADN por los que pueda transportarse la corriente eléctrica.

Independientemente de su carga, dadas sus dimensiones el ADN es un nanobiopolímero con el cual es posible diseñar y construir nanoestructuras artificiales con diferentes formas y aplicaciones. Aprovechando que las hebras complementarias del ADN tienden a unirse como lo hacen los dos lados de una cremallera, es posible ensamblar cadenas de ADN con secuencias artificiales predefinidas (fácilmente sintetizables en los laboratorios) y construir así las bionanoestructuras tridimensionales que se desee. Por ejemplo, se han generado estructuras ramificadas de ADN con las cuales se aumenta mucho la capacidad de los biosensores para detectar secuencias concretas, como por ejemplo regiones del genoma de una bacteria o un virus presente en una muestra natural. En otros casos, se han diseñado cadenas de ADN parcialmente complementarias que se autoensamblan en poliedros regulares como tetraedros o cubos cuando se ponen en disolución (Figura 7.8A). Este sistema se conoce actualmente como «origami de ADN» por su similitud con el arte de origen japonés que en español conocemos como papiroflexia. Alardeando del dominio de esta técnica, científicos de la Universidad de Harvard (EE.UU.) han construido recientemente un alfabeto completo y una colección de símbolos, con «tamaño de fuente» de 100 nm, formados cada uno de ellos por cientos de moléculas de ADN de 42 nucleótidos capaces de autoensamblarse

(Figura 7.8B). Otros investigadores de esa misma Universidad han diseñado un sistema modular para ensamblar moléculas de ADN de 34 nucleótidos y construir la estructura tridimensional que se desee, como si se tratase de un «nano-Lego» con infinitas posibilidades.

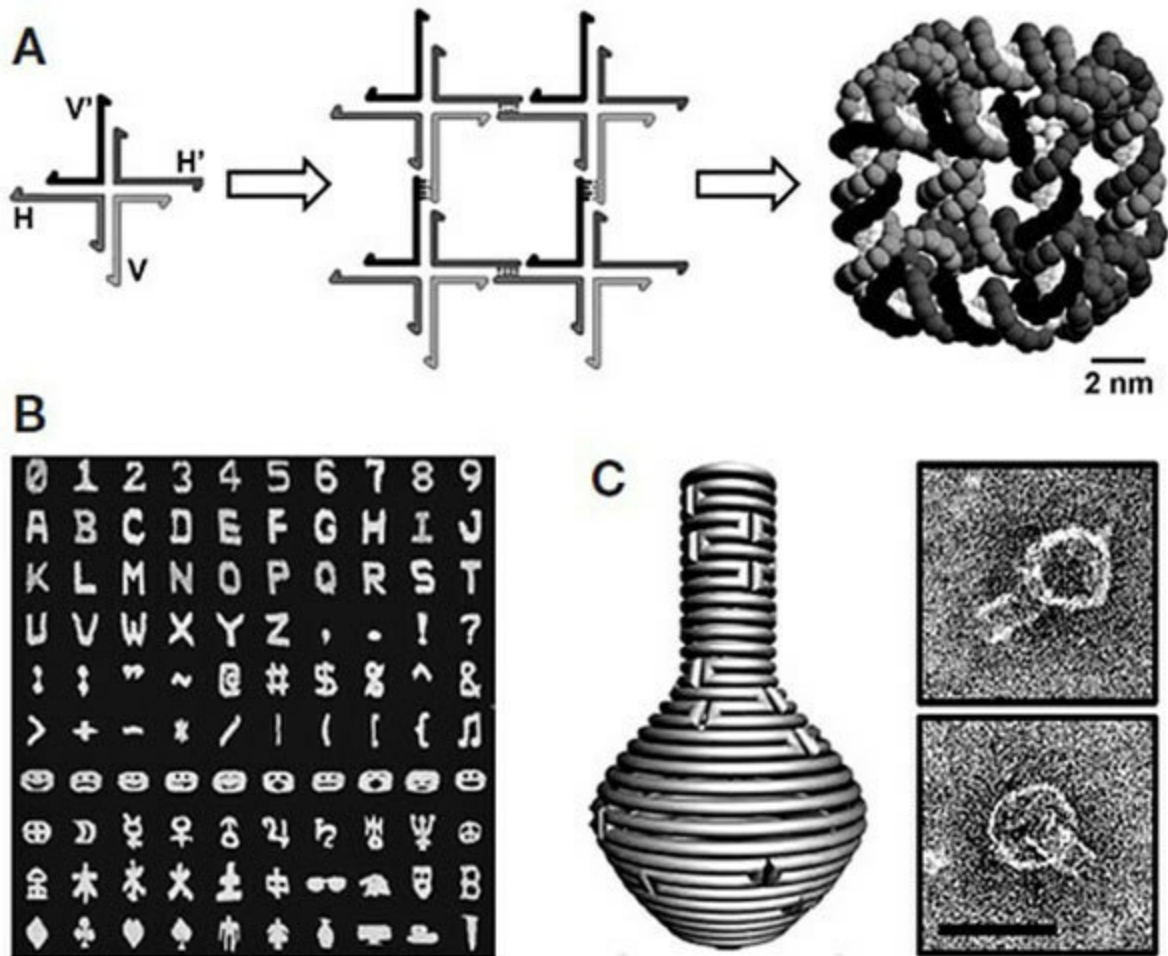


FIGURA 7.8. A. Fases del ensamblaje de un nanocubo de ADN (figura adaptada de N. C. Seeman, Nature, 2003). B. Alfabeto formado por moléculas de ADN, con «tamaño de fuente» de 100 nm, visualizadas por AFM (Instituto Wyss de Ingeniería bio-inspirada, Universidad de Harvard, EE.UU.). C. El arte del origami molecular: nanomatraz construido con hebras de ADN, y sus imágenes por TEM, barra de 50 nm (figura adaptada de D. Han, Science, 2011).

La similitud de esta versátil técnica con el origami es tal que se ha puesto a punto un sistema que permite diseñar no sólo poliedros regulares o formas con caras planas, sino también estructuras 3D curvadas como semiesferas, esferas completas, elipsoides e incluso «nanomatrices» que recuerdan a los que, con un tamaño un millón de veces mayor, se usan en los laboratorios (Figura 7.8C). El principal interés de estas nanoestructuras de ADN está en que pueden incluir otras moléculas en su interior, convirtiéndose en herramientas útiles en biomedicina. Así, se está explorando el uso de nanoestructuras de ADN como transportadores de fármacos o anticuerpos: estos

nanocontenedores podrían entrar a una célula diana (por ejemplo tumoral o infectada por un virus), y en su interior la estructura de ADN se abriría controladamente (o bien sería degradada por las enzimas celulares) liberando su contenido activo.

Por último, además de utilizar el ADN como nanomaterial para construir estructuras y nanocontenedores, se han desarrollado métodos para unir zonas concretas del ADN a proteínas u otras biomoléculas, y para combinarlo con nanomateriales artificiales como nanopartículas de distinto tipo, dendrímeros, nanotubos de carbono, fullerenos o grafeno. De esta forma, dos cadenas complementarias de ADN pueden unirse a sendas moléculas o nanomateriales, que quedarán aproximados a la distancia deseada cuando las hebras hibriden entre sí. Así, por ejemplo, si una hebra de ADN inmovilizada sobre una superficie se hibrida a su cadena complementaria unida por un extremo a un nanotubo de carbono, se logra guiar el nanotubo hasta el punto concreto de la superficie en el que estaba anclada la primera hebra. Estos sistemas de funcionalización del ADN permiten también aumentar su capacidad para formar monocapas autoensambladas sobre diferentes materiales, y el desarrollo «capa a capa» de nuevos tipos de biosensores, de los que se hablará en el apartado 7.8.

7.7. Hacia la vida sintética

Dos de los ámbitos de investigación más fascinantes de la biología actual, a los que la nanotecnología también está contribuyendo, son el estudio del origen de la vida y la búsqueda de procedimientos para poder sintetizar vida artificial en los laboratorios. En ambos casos, una de las primeras dificultades que surgen es encontrar una definición de *vida* que permita distinguir claramente entre la materia inanimada y la viva, es decir, entre la química y la biología. Durante el período de unos 400 millones de años (Ma) en el que se originó la vida (entre hace 3900 Ma y hace 3500 Ma) se produjeron diferentes eventos moleculares que llevaron a la emergencia de sistemas compartimentados, con metabolismo y material genético capaces de replicarse y evolucionar por selección natural. Filósofos y científicos han situado el límite entre lo «vivo» y lo «no vivo» en distintas etapas de ese camino, generalmente en función de los intereses de su propio campo de investigación. Está claro que una roca amorfa no es un ser vivo, y que una bacteria sí lo es, pero ¿qué ocurre con los pasos intermedios que necesariamente debieron producirse? ¿Está vivo un cristal, una vesícula lipídica capaz de crecer y dividirse, o una molécula de ARN que tuviera capacidad para copiarse a sí misma?

Uno de los casos más controvertidos es el de ciertas «entidades replicativas» de las

cuales ya hemos hablado en este capítulo: los virus y los viroides. Su adscripción entre los seres vivos o los sistemas inanimados es siempre conflictiva, porque pueden replicarse y evolucionar, pero no de forma autónoma sino a expensas de las actividades metabólicas de la célula que parasitan. Podría decirse que estos patógenos se comportan *como seres vivos* cuando están dentro de su célula hospedadora, pero no en su fase extracelular. Cuando salen de la célula, no son más que partículas nanométricas formadas por ácidos nucleicos (unidos a proteínas, en el caso de los virus) que se degradan rápidamente si no vuelven a infectar otra célula. En cualquier caso, existen sistemas aún más difíciles de clasificar, como los cristales inorgánicos capaces de hacer copias de sí mismos replicando incluso los errores presentes en sus sistemas cristalinos, o los programas informáticos que se copian a sí mismos y evolucionan para adaptarse a los recursos (de *hardware* y *software*) disponibles en el ordenador que los aloja. Ante la imposibilidad de consensuar qué es la vida, son muchas las *definiciones operativas* de vida que actualmente conviven, algunas de las cuales han sido propuestas por investigadores de las universidades del País Vasco y de Valencia. Una de las más aceptadas es la que ha acuñado el bioquímico G. F. Joyce, del Instituto de Investigación Scripps en California, y que ha sido asumida por el Instituto de Astrobiología de la NASA (NAI): «un ser vivo es un sistema químico automantenido que evoluciona como consecuencia de su interacción con el medio».

Por tanto, sintetizar vida en un laboratorio (una aspiración aún irrealizable) significaría construir una entidad replicativa y metabólicamente viable dotada de un genoma (en principio, de ADN o de ARN) capaz de transmitirse a su progenie. Para ello, algunos investigadores del ámbito de la «biología sintética» realizan una aproximación de tipo descendente, partiendo de información biológica contenida en la secuencia de los genomas de los organismos actuales. Los primeros pasos en este sentido comenzaron a darse hace cuatro décadas, con el desarrollo de la ingeniería genética y la biotecnología. Así, se ha logrado dotar a ciertos organismos ya existentes de nuevas funciones o propiedades (por ejemplo, la capacidad de que una bacteria degrade un determinado compuesto químico contaminante, que capture eficientemente el CO₂ atmosférico, o que produzca insulina humana) gracias a la inclusión en ellos de los genes que codifican las proteínas necesarias. Así, cada vez con mayor frecuencia se están originando en los laboratorios organismos *no naturales* con distintas finalidades. Una variante de esta aproximación está relacionada con el desarrollo de plantas y animales transgénicos, que incluyen en su genoma secuencias exógenas para hacerlos resistentes a enfermedades o plagas, sobrevivir en diversos ambientes, adquirir nuevas características organolépticas, o aumentar su rentabilidad económica. En el extremo de esta visión de la biología sintética están los logros de C. Venter y su instituto de

investigación en EE.UU., quienes han ensamblado el genoma completo de un virus (el bacteriófago PhiX174) y también el de la bacteria *Mycoplasma genitalium* a partir de fragmentos de ADN previamente sintetizados en otro laboratorio.

Sin embargo, desde el punto de vista de la bionanotecnología, resultan más relevantes las estrategias ascendentes que buscan construir un sistema vivo completo «pieza a pieza», a partir de cada uno de sus componentes moleculares por separado. Con ello, además, se lograría avanzar hacia la comprensión de los procesos que pudieron producirse durante el origen de la vida. De hecho, visto desde la óptica de la bionanotecnología, el origen de la vida podría identificarse con la aparición de nanosistemas moleculares capaces de replicarse a sí mismos... haciéndolo suficientemente mal como para producir errores y poder evolucionar. Intentando simular ese proceso, la «creación de vida» a partir de constituyentes inanimados es un tema controvertido dentro y fuera de la ciencia, pero está siendo ya explorado por muchos investigadores. Una primera limitación para lograr sintetizar vida *ex novo* es que, aunque la tecnología se ha desarrollado mucho, nuestro conocimiento de los seres vivos es aún insuficiente, sobre todo en cuanto a las interacciones entre moléculas que sustentan el proceso vital. Pero ya se están dando pasos decididos en esa dirección, como se muestra en los ejemplos de la Figura 7.9.

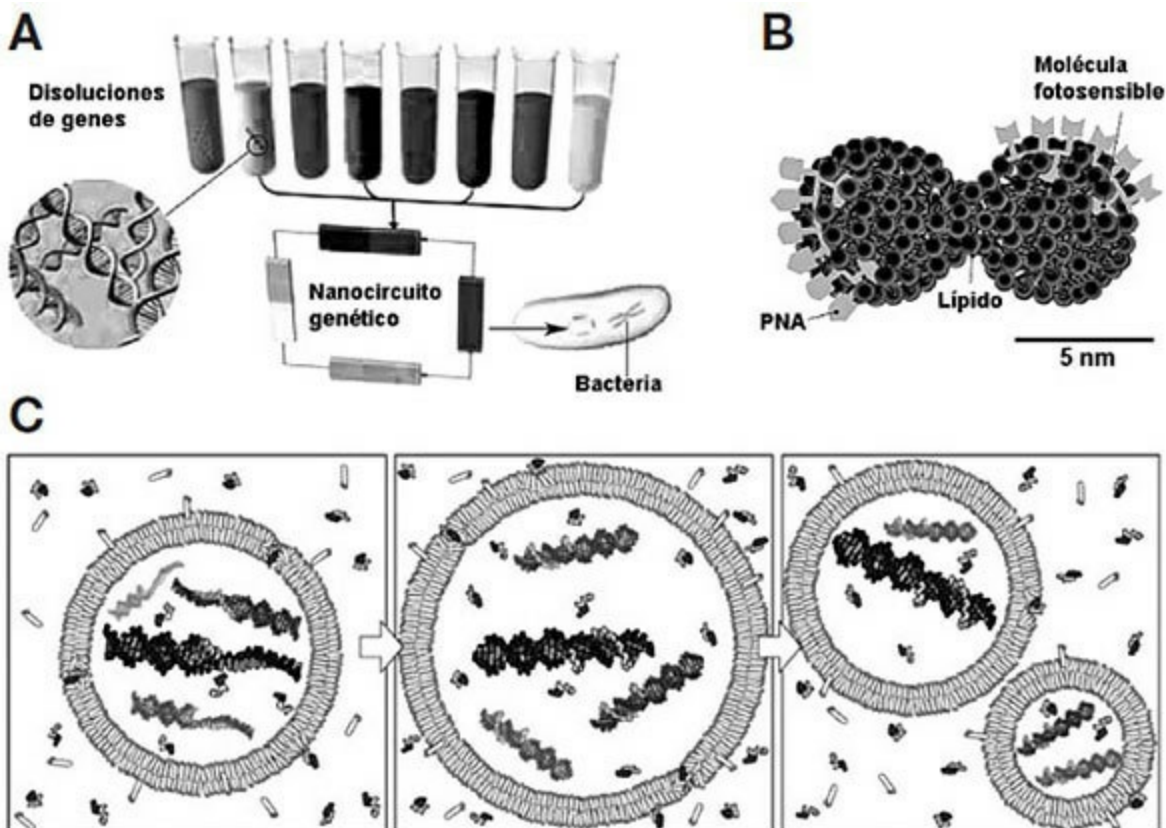


FIGURA 7.9. Algunos planteamientos de la biología sintética. A. Construcción de nanocircuitos genéticos capaces de funcionar dentro de una bacteria receptora (figura adaptada de W. Gibbs, *Scientific American*, 2004). B. Ensamblaje de agregados de macromoléculas biológicas que podrían llegar a constituir sistemas autorreplicativos (adaptada de S. Rasmussen *et al.*, *Artificial Life*, 2003). C. Protocélulas experimentales con ácidos nucleicos en su interior, capaces de dividirse (adaptada de S. S. Mansy *et al.*, *Nature*, 2008).

El grupo de D. Endy en la Universidad de Stanford (EE.UU.) construye «nanocircuitos genéticos» que en lugar de componentes electrónicos poseen genes con la información para producir las proteínas que catalizan reacciones metabólicas fundamentales en los seres vivos. Siguiendo esta línea de trabajo, en diferentes laboratorios (e incluso mediante concursos en los que participan estudiantes universitarios) se combinan *biobricks* o ladrillos genéticos (genes, o bien las regiones que regulan la activación de dichos genes), con el fin de construir sistemas biológicos sintéticos. En paralelo, otros investigadores ensamblan agregados biomoleculares progresivamente más complejos, con el objetivo de que lleguen a funcionar como células artificiales, o avanzan en la fabricación de protocélulas sintéticas, algunas de las cuales incluyen material genético capaz de reproducirse con ayuda de enzimas. En esta última línea de trabajo destacan los logros de J. W. Szostak y su grupo en la Universidad de Harvard (EE.UU.). Con todo ello, se está empezando a combinar de forma coherente los tres ingredientes básicos de la vida (compartimento, genoma y metabolismo), de forma que quizá algún día veamos cómo puede *surgir vida* a partir de sus componentes por separado. ¿Se podrá entonces construir en el laboratorio una bacteria que se comporte como las naturales y sea capaz de competir con ellas por los recursos? ¿Y una orquídea? ¿Un *Boletus edulis*? ¿Un hipopótamo? ¿Un ser humano? ¿Podría llegar a existir una «versión nanotecnológica» de aquel Frankenstein que M. W. Shelley imaginó hace dos siglos?

Ante estas inquietantes cuestiones, hasta el momento parece que los organismos que se están modificando genéticamente en los laboratorios son menos robustos que los naturales, debido a que estos últimos se han ido optimizando progresivamente a lo largo de millones de años de evolución. Por tanto, podemos pensar que incluso si los investigadores llegaran a unir exitosamente las nanopiezas del puzle de un ser vivo (usando técnicas como las descritas en el apartado 7.5, o las que se desarrollen en el futuro) no serían capaces de igualar el rompecabezas que la naturaleza ha ido construyendo desde el inicio de la vida y sometiéndolo paso a paso a la prueba de la evolución por selección natural. Además, como ha escrito el biólogo y filósofo A. Moya (del Instituto Cavanilles de Biodiversidad y Biología Evolutiva de Valencia), la aplicación a los sistemas biológicos del «Teorema de la Indecibilidad» de K. Gödel muestra que «existen propiedades dentro de una célula que no son ni demostrables ni refutables de acuerdo con las reglas que definen el sistema». Por tanto, aunque

Llegáramos a conocer todos los elementos que componen una célula y las reglas que definen sus interacciones, sería imposible predecir la aparición de nuevas propiedades en ella, o la ausencia de otras que resultan necesarias para su viabilidad. De hecho los seres vivos son un ejemplo de los denominados «sistemas complejos», en los que a menudo emergen propiedades nuevas que eran inicialmente impredecibles. Dicho de otra forma, en biología *el todo* es siempre más que la suma de las partes.

Nos esperan muchas horas de juego hasta completar el puzle de un ser vivo, y además puede que al final el resultado no se parezca a la fotografía que teníamos delante. En cualquier caso, hasta ahora la bionanotecnología y la biología molecular no hacen sino utilizar o copiar los componentes que ya existen en los seres vivos actuales, y son aún muy escasos los científicos que se plantean sintetizar formas de vida radicalmente distintas de las que ya han triunfado en nuestro planeta. Quizá, si alguna vez se encontrase vida fuera de la Tierra y además se demostrara que su origen fue diferente del nuestro, se podría empezar a disponer de claves sobre cómo *la misma química* puede originar *distintas biologías*.

7.8. Los nanobiosensores y sus aplicaciones

Los biosensores, tal como se indicó en el apartado 6.4, son dispositivos que permiten analizar muestras complejas (por ejemplo el agua de un río, un alimento o nuestra sangre) y determinar si en ellas existen determinadas sustancias o «moléculas diana» (que también pueden ser virus o bacterias completos). Por tanto, son herramientas de gran aplicabilidad en biotecnología, medioambiente, alimentación y medicina. Entre los numerosos biosensores que se han desarrollado durante los últimos años, algunos permiten detectar y/o cuantificar muchas moléculas simultáneamente: son los llamados microarrays, «chips» o «microchips». En ellos miles de «moléculas sonda» o sensoras, principalmente proteínas o cadenas cortas de ADN, se unen mediante enlaces covalentes a un soporte rígido (por ejemplo una placa de vidrio, silicio u oro) o bien a una membrana (habitualmente de nitrocelulosa o nailon). El uso de un sistema robotizado permite imprimir una disposición bidimensional de puntos con dimensiones micrométricas (por lo general, de 50 a 150 μm de diámetro) en posiciones predefinidas, en cada uno de los cuales hay un único tipo de molécula sonda. Para entender cómo funciona un biosensor de este tipo imaginemos, por ejemplo, un microarray de proteínas en el que cada punto contiene un tipo de anticuerpo (sonda) capaz de unirse a una proteína (diana) determinada. La muestra problema (que podría ser un extracto de las proteínas presentes en nuestra sangre) se une a una molécula

orgánica capaz de emitir una señal fluorescente cuando es iluminada por un rayo láser con determinada longitud de onda (existen muchos reactivos de este tipo), y ese conjunto de proteínas marcadas se pone en contacto con el microarray. Como resultado, las proteínas presentes en la muestra problema que «encuentren» su anticuerpo específico en el microarray se unirán a él, mientras que las demás se eliminarán en un posterior proceso de lavado. Con ello, al hacer incidir la radiación láser sobre el microarray, mediante un escáner de alta resolución podremos ver algunos puntos fluorescentes mientras que otros no mostrarán señal: los primeros nos indican qué proteínas había en la muestra analizada.

Existen también distintos tipos de microarrays de ADN, en los que las moléculas sonda son cadenas cortas de ADN y las dianas son moléculas de ADN o ARN que se unen a las sondas si las secuencias de ambas son complementarias (ver apartado 7.6). Estos microarrays se usan, por ejemplo, para detectar la presencia del genoma de un virus o una bacteria en la sangre, y para determinar si en ellos existen mutaciones que los hacen resistentes a algunos fármacos antivirales o antibióticos, respectivamente. En general, una ventaja de los microarrays es su gran capacidad de «multiplexado», es decir, de analizar muchas muestras en paralelo. Así, las aplicaciones de los microarrays son numerosas en distintos campos de la biomedicina.

El siguiente paso en este campo se ha dado gracias a la nanotecnología, con la incorporación de nanomateriales a los biosensores (ver apartado 6.4) y con el uso de nuevos procedimientos de fabricación que permiten generar puntos de dimensiones nanométricas con las moléculas sensoras. Así, se dispone ya de «nanoarrays» de ADN y proteínas formados por puntos de entre 100 y 500 nm de diámetro (Figura 7.10), y se han desarrollado sensores formados incluso por moléculas individuales unidas a una superficie. Con ello, el proceso de detección de la molécula diana es más rápido, puede realizarse en mucho menos espacio, y es posible completar el análisis partiendo de cantidades muy pequeñas de muestra. Además, los nanoarrays permiten utilizar técnicas de detección distintas a la fluorescencia, algunas de las cuales no requieren ningún tipo de marcaje de la muestra problema, con lo que la sensibilidad de detección aumenta. En un campo que ya se conoce como nanoproteómica se están desarrollando nanoarrays de proteínas para detectar, en tiempo real y formato multiplex, proteínas o analitos poco abundantes en muestras naturales complejas. Así, se espera llegar a un nanochip con miles de puntos sensores que pudiera ser integrado en nuestro organismo, con el cual se analizarían y cuantificarían en tiempo real los componentes de la sangre.

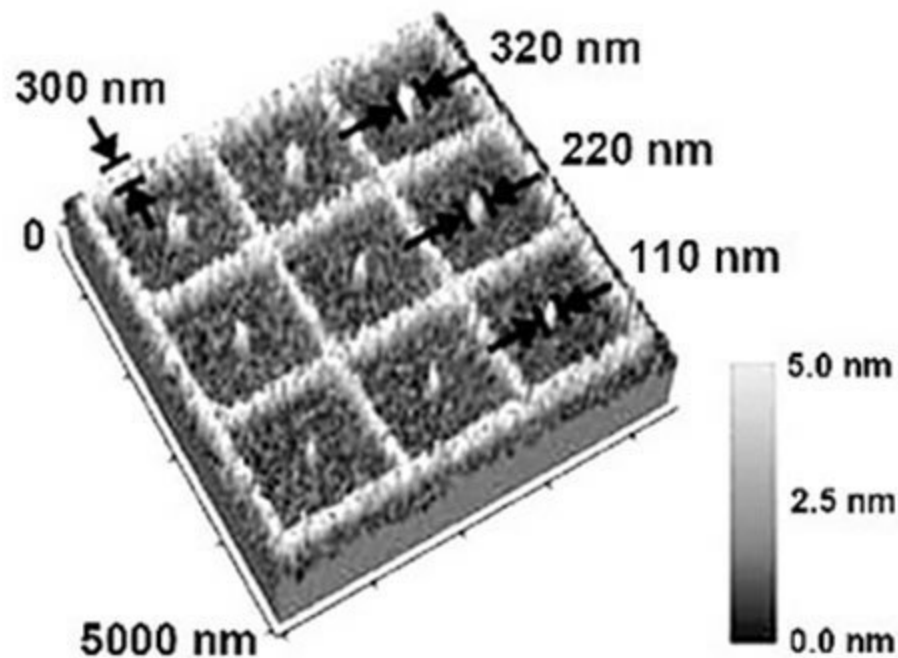


FIGURA 7.10. Nanoarray de proteínas que contiene puntos de entre 100 y 300 nm de diámetro generados mediante técnicas nanolitográficas (figura adaptada de K. B. De Lee *et al.*, *Science*, 2002).

La aplicación de la nanotecnología al mundo de los biosensores ha permitido construir otros sistemas analíticos totalmente diferentes a los conocidos hasta hace una década. Como ejemplo, se ha desarrollado un dispositivo basado en nanohilos de silicio, capaz de detectar y caracterizar virus individuales mediante el cambio en conductividad eléctrica que se produce en ellos al interaccionar con el virus. Estos nanocables pueden operar directamente al ser sumergidos en un fluido biológico natural (como agua, sangre o saliva), por lo que son utilizables como biosensores portátiles. Paralelamente, en la Universidad de California en Los Ángeles (EE.UU.) se ha desarrollado un material similar al velcro pero con dimensiones nanométricas, en el que los nanohilos de silicio están recubiertos de anticuerpos específicos contra ciertas proteínas que poseen en su membrana las células tumorales. Este «nanovelcro» es capaz de detectar y capturar las células cancerígenas que se desprenden de un tumor y circulan por los fluidos biológicos, lo que permite cuantificar su número y predecir la evolución de la enfermedad. Otra línea de investigación novedosa y muy prometedora consiste en unir los receptores olfativos (proteínas quimiosensoras de dimensiones nanométricas) de nuestra pituitaria a un dispositivo electrónico, generando así un biosensor capaz de «oler» artificialmente. Dichos nanosensores olfativos artificiales, también llamados «narices electrónicas», poseen aplicaciones clínicas ya que pueden implantarse en personas con el sentido del olfato atrofiado o alterado. Además tienen utilidad en la industria, por ejemplo para detectar la presencia de una sustancia tóxica o

un gas explosivo en el aire, para analizar perfumes de manera sistemática, o para oler vinos sin la subjetividad del catador.

Con todo ello, los avances actuales permiten fabricar auténticos «laboratorios en miniatura» (conocidos en inglés como sistemas *lab-on-a-chip*), que integran nanobiosensores, sistemas de microfluídica, y componentes de excitación, lectura y análisis en un solo dispositivo. Así, un procedimiento analítico que hace pocos años requería el trabajo de varias personas en uno o más laboratorios se reduce extraordinariamente en cuanto a tamaño, velocidad de análisis y precio por muestra procesada. La posibilidad de disponer de biosensores miniaturizados y de gran sensibilidad es uno de los logros que nos están acercando al sueño de conseguir una medicina personalizada.

7.9. Los retos de la nanomedicina

Los múltiples avances conceptuales y tecnológicos descritos hasta este punto han hecho que la «nanomedicina» (también llamada «nanobiomedicina») se esté convirtiendo en una realidad esperanzadora. Esta disciplina emergente se basa en la combinación del estudio molecular del cuerpo humano con la posibilidad de construir dispositivos nanométricos, teniendo como objetivo mejorar el diagnóstico y proporcionar nuevas herramientas terapéuticas. En el ámbito del diagnóstico, se busca aumentar la sensibilidad y especificidad de las técnicas convencionales y desarrollar nanobiosensores de utilidad tanto *in vitro* como *in vivo*. En la dimensión terapéutica, la nanomedicina trata de optimizar fármacos ya existentes, desarrollar nuevos y más efectivos sistemas de suministro y dosificación de medicamentos, construir nanomateriales biocompatibles y poner a punto tecnologías alternativas para la ingeniería tisular y la medicina regenerativa. Además, al poder estudiar interacciones moleculares individuales, la nanotecnología permite comprender mejor el funcionamiento del cuerpo humano, y optimizar la respuesta clínica que debe darse cuando se produce una patología.

Uno de los campos en desarrollo es el nanodiagnóstico, que conlleva la utilización de nanodispositivos y nanobiosensores para identificar, a escala molecular, las enfermedades o la predisposición a ellas. Además, se intenta responder a un reto de la farmacología: poder detectar los potenciales efectos secundarios de los medicamentos antes de ser prescritos en sus dosis terapéuticas. Otra de las metas planteadas es optimizar el diagnóstico por imagen hasta poder visualizar moléculas individuales. Un curioso ejemplo de la aplicación de la nanomedicina al diagnóstico se está

desarrollando en la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, donde colaboran con la industria textil para fabricar tejidos inteligentes que contienen un tinte elaborado con nanotubos de carbono modificados. Con ello, la ropa se convierte en un conductor eléctrico que detecta sustancias químicas presentes (por ejemplo, en el sudor) y diagnostica el estado de salud de quien la viste. Además de su uso en medicina, estos tejidos resultarían útiles en las prendas deportivas profesionales, al poder servir como sistemas de control antidopaje en tiempo real. En cuanto a las aplicaciones en terapia, uno de los retos de la nanomedicina consiste en el desarrollo de nuevos sistemas de liberación de fármacos, para mejorar la relación eficacia/toxicidad de las moléculas que constituyen el arsenal terapéutico disponible. Para ello se están poniendo a punto diferentes nanosistemas capaces de vehicular fármacos a las células o tejidos enfermos, tal como se expone en detalle en el apartado 7.10.

Tanto en diagnóstico como en terapia, uno de los campos de la medicina que más se está beneficiando de los avances en nanotecnología tiene que ver con el tratamiento del cáncer. Así, por ejemplo, el uso de nanopartículas metálicas (de las que se habla en el Capítulo 6) aumenta mucho el contraste de las pruebas diagnósticas basadas en resonancia magnética nuclear, con lo que se pueden detectar tumores en etapas muy tempranas de formación. En otros casos, estas nanopartículas permiten la destrucción de tejidos cancerosos o infectados mediante procesos de «ablación térmica»: una vez que han llegado a su diana (gracias a los anticuerpos que la recubren), utilizando campos electromagnéticos exteriores se induce un aumento rápido y muy localizado de su temperatura, destruyendo las células cercanas. Por otra parte, el desarrollo de nanosistemas dispensadores específicos para cada tejido tumoral permitirá reducir la dosis del fármaco (o combinación de ellos) administrado, y así limitar los efectos secundarios de la quimioterapia actual.

Otra de las aproximaciones terapéuticas más prometedoras es la denominada «nanomedicina regenerativa», que consiste en el desarrollo de tejidos mixtos entre moléculas biológicas y materiales nanoestructurados. Esta combinación está resultando muy útil para dirigir la proliferación, migración y diferenciación celular, para organizar o reparar la matriz extracelular de los tejidos (lo que se conoce como ingeniería tisular), y para construir prótesis o implantes biocompatibles que no originen problemas de rechazo. Como ejemplo, se han desarrollado nanofibras artificiales de péptidos (polímeros cortos formados por aminoácidos) que poseen un diámetro de unos 7 nm y son capaces de autoensamblarse y solidificar la solución que los contiene, lo que permite reconstruir tejidos humanos dañados. Se trabaja también con nanopolímeros diseñados para recubrir dispositivos artificiales que van a estar en contacto con la sangre, como válvulas cardíacas o catéteres, lo que dificulta la

formación de coágulos y minimiza las respuestas adversas del organismo. Por otra parte, una línea de investigación desarrollada en la Universidad de Edimburgo (Reino Unido), que combina nanotecnología y medicina regenerativa, consiste en introducir nanopartículas magnéticas en células madre que, al ser inyectadas en el torrente sanguíneo, permiten seguir sus movimientos por el organismo mediante resonancia magnética nuclear. En el primer estudio clínico publicado se ha determinado que las células con nanopartículas se comportan igual que cualquier otra célula madre, y no se han detectado efectos secundarios debidos a dichos nanomateriales. Además, se ha podido seguir la migración de las células madre marcadas durante la semana siguiente a la inoculación, mostrándose cómo llegan a las zonas inflamadas que requerían regenerarse.

Otra línea de investigación relevante se basa en que, al poder manipular las moléculas biológicas individualmente, es posible construir «nanointerruptores genéticos» con los que se logra, por ejemplo, activar o desactivar un determinado gen. Ello podrá servir en el futuro para ralentizar o anular procesos celulares asociados con el cáncer, con otras enfermedades, o incluso con el envejecimiento. En este ámbito, se han desarrollado nanopartículas metálicas recubiertas con anticuerpos específicos que las dirigen a unas proteínas que ciertas células tienen insertadas en sus membranas y que funcionan como «canales» transportadores de sustancias, cuya apertura requiere un aumento local de la temperatura. Así, cuando las nanopartículas ya han llegado a su diana son estimuladas por radiación electromagnética con longitud de onda de las radiofrecuencias. Esta radiación atraviesa los tejidos biológicos sin modificarlos, calienta las nanopartículas al llegar a ellas, y la consiguiente apertura del canal proteico permite la entrada en la célula de iones calcio (Ca^{2+}) presentes en el medio extracelular. Estos cationes son capaces de estimular la producción de insulina (una hormona de naturaleza proteica que desempeña un papel fundamental en la diabetes) intracelular, ya que dicha célula había sido modificada genéticamente para contener el gen que produce esta proteína bajo el control de un promotor (la región del genoma que actúa como interruptor para que un gen se exprese o no) inducible por calcio. Así, esta elegante combinación de nanotecnología e ingeniería genética ha permitido un logro impensable hace pocos años: desencadenar la producción de una hormona por control remoto.

7.10. Nanosistemas dispensadores de fármacos

La medicina actual requiere administrar fármacos a los pacientes de forma más eficiente, simplificando los sistemas tradicionales (que hasta ahora obligan a tomarlos repetitivamente por vía oral, nasal o tópica) y eliminando en lo posible los métodos más invasivos (por vía parenteral, en sus variantes subcutánea, intramuscular o intravenosa). En este sentido, desde hace algunos años se están desarrollando dispositivos electrónicos que se implantan bajo la piel y liberan automáticamente las dosis diarias de fármacos que necesita cada enfermo. Uno de los sistemas más modernos, fabricados por la compañía MicroCHIPS (originada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, MIT, EE.UU.), tiene un tamaño menor de 1 cm^2 , y se controla desde el exterior mediante tecnología inalámbrica. En el primer ensayo clínico concluido se ha utilizado con éxito durante un año para liberar cada día la dosis de un medicamento necesario para tratar la osteoporosis. Este fármaco estaba alojado en tantas microceldas como dosis eran necesarias durante el ensayo, que se abrían al recibir un impulso eléctrico desde el dispositivo de control exterior. Éste es un ejemplo de tecnología «micro» y aún no «nano», pero indica los nuevos caminos por los que está transitando la medicina.

Dando el salto al nanomundo, el desarrollo de nanosistemas dispensadores de fármacos busca generar estructuras capaces de dirigirse con precisión a un tejido enfermo y liberar en él los fármacos necesarios para sanarlo. Con ello, frente a los sistemas usados en la farmacología convencional, se logra aumentar la estabilidad y biodisponibilidad del fármaco, y además disminuir los efectos secundarios que podría producir en otros tejidos. Esta estrategia está siendo muy exitosa tanto en la investigación como en la industria, ya que distintas empresas farmacéuticas comercializan actualmente cerca de doscientos fármacos que incluyen nanosistemas dispensadores o coadyuvantes. Algunos de estos productos que ya están en el mercado se describirán en el Capítulo 8. Además, un dato relevante es que del total de nuevos compuestos en evaluación clínica para el tratamiento de distintos tipos de cáncer, aproximadamente un 10% (es decir, entre 40 y 50) implican nanoestructuras para su transporte y liberación.

Los fármacos transportables pueden ser moléculas orgánicas (naturales o de síntesis) de distintos tamaños, péptidos, enzimas, anticuerpos, proteínas, o distintos tipos de ácidos nucleicos. Entre estos últimos están los que bloquean determinados genes al hibridarse con ellos (por ejemplo los «ARN interferentes»), así como las moléculas obtenidas mediante procesos artificiales de «selección in vitro» (incluyendo los «aptámeros»: ácidos nucleicos cuya estructura tridimensional les permite unirse a cualquier molécula diana, de forma similar a como lo hace un anticuerpo con su antígeno). Por su parte, entre los nanosistemas dispensadores de estos fármacos están

los formados por átomos metálicos (como las nanopartículas de oro, o las que poseen un núcleo magnético) o por una única entidad molecular (como los dendrímeros o los nanotubos de carbono). Además de estos nanosistemas (descritos en los Capítulos 4 y 6), otros contienen múltiples unidades moleculares ensambladas entre sí mediante enlaces no covalentes (como micelas, vesículas, liposomas, nanopartículas poliméricas o nanocápsulas), y también pueden utilizarse nanocontenedores naturales como cápsidas víricas vacías o virus completos inactivados. Algunos de estos ejemplos se muestran en la Figura 7.11. Para dirigir tales nanosistemas hacia su diana terapéutica (por ejemplo, una célula tumoral, una célula infectada, o una bacteria patógena) en su exterior se colocan biomoléculas como anticuerpos o ligandos específicos de dicha diana. En conjunto, estos nanosistemas dispensadores ofrecen la ventaja adicional de que, al proteger el fármaco durante su transporte por la sangre u otro fluido biológico, permiten preservar la funcionalidad de moléculas muy activas terapéuticamente pero que en condiciones normales se degradarían antes de llegar a su destino.

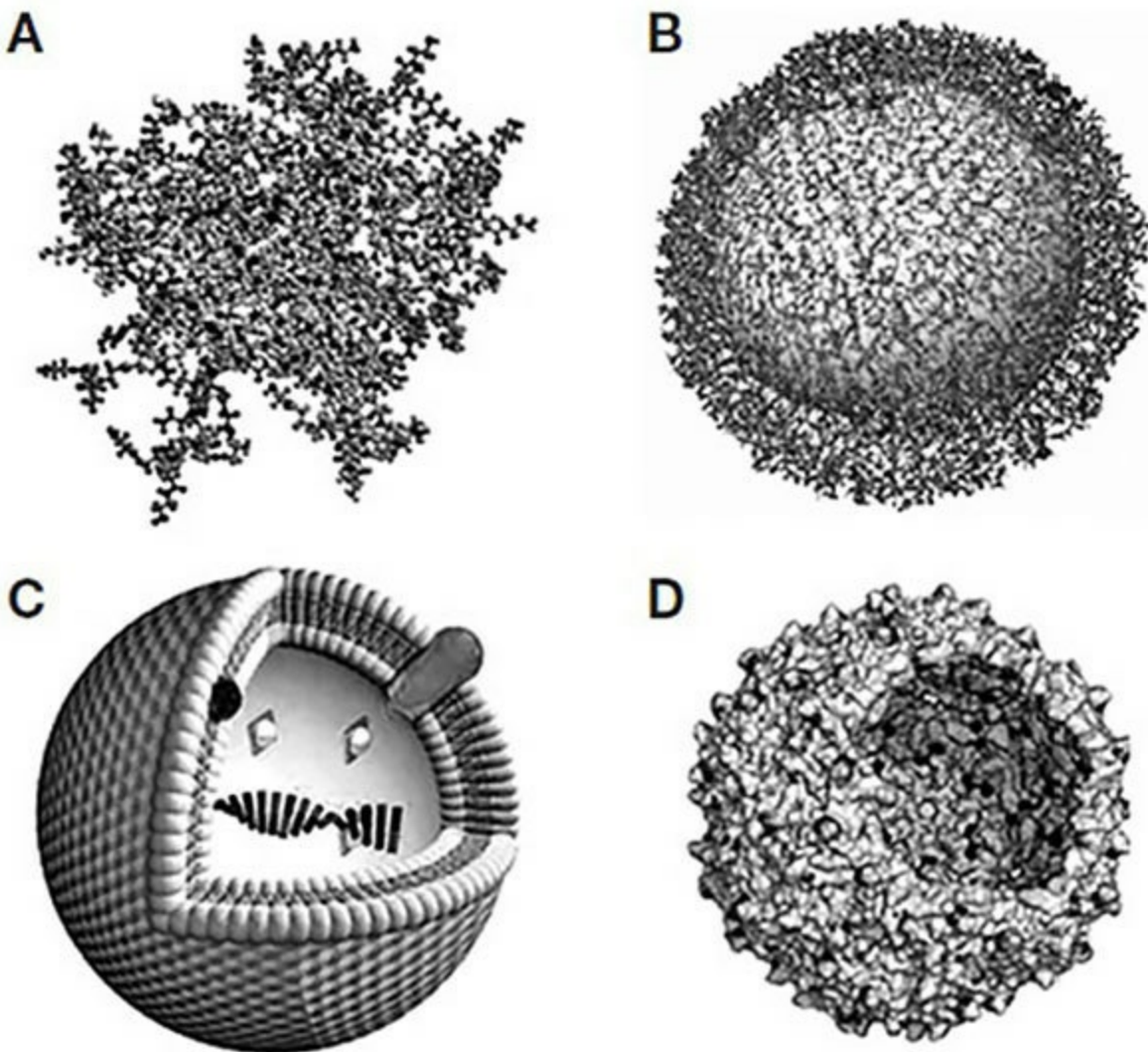


FIGURA 7.11. Ejemplos de nanosistemas dispensadores de fármacos: A. Dendrímero. B. Nanopartícula. C. Liposoma. D. Cápsida vacía de un virus.

Los nanosistemas dispensadores basados en vesículas artificiales o liposomas son contenedores esféricos formados por ácidos grasos o lípidos, respectivamente, y poseen por lo general entre 20 y 100 nm de diámetro. En su cavidad interior llevan una solución acuosa en la que está disuelto el fármaco, y en su membrana se pueden insertar proteínas que dirijan el nanosistema hacia su diana y desencadenen la fusión de ambas membranas. Algo similar se puede lograr empleando un virus modificado, al que se ha extraído o inactivado el genoma para que no sea infectivo, y que sirve únicamente como un vehículo de transporte especializado. En ambos casos, cuando la vesícula o el virus modificado llegan a la célula, la carga terapéutica se libera directamente en su interior.

En esta misma línea, pero sin necesidad de que el nanosistema vaya cargado con un fármaco, se ha demostrado que es posible modificar algunos virus para que sean capaces de dirigirse a células diferentes de sus dianas naturales, entrar en ellas y destruirlas. Así, uno de los ejemplos más esperanzadores se ha diseñado recientemente por colaboración entre el Instituto Catalán de Oncología y el Hospital Niño Jesús de Madrid, y consiste en el empleo de adenovirus del catarro (cuyo diámetro es de unos 100 nm) modificados para que reconozcan exclusivamente células tumorales del sistema nervioso. La replicación viral en su interior produce la lisis o ruptura de la célula, con lo que nuevos virus se liberan y siguen atacando más células del tumor. Tras los ensayos previos de seguridad (especialmente estrictos porque esta terapia va destinada a niños), ya está en marcha un ensayo clínico que estudia la eficacia terapéutica de este prometedor sistema.

Por su parte, un ejemplo reciente del uso de nanopartículas con estos fines ha permitido desarrollar nanopartículas porosas que liberan selectivamente fármacos en células humanas senescentes (es decir, envejecidas), o bien en aquellas que han entrado en fase degenerativa. En esta línea de investigación, llevada a cabo por el Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas de Valencia en colaboración con otros centros de nuestro país, las nanopartículas contienen en su superficie externa una molécula que impide la salida de la carga terapéutica hasta llegar a su destino, donde el fármaco se libera de forma selectiva. Las aplicaciones de este avance de la nanomedicina en cáncer, en Alzheimer o en la enfermedad de Parkinson son evidentes y muy esperanzadoras. Finalmente, los nanotubos de carbono también han demostrado su potencialidad para transportar moléculas bioactivas en su interior, en proyectos de investigación como uno recientemente financiado por la UE en el cual los nanotubos funcionalizados incluyen en su interior dos fármacos antitumorales: el nanosistema llega únicamente a las células cancerígenas y libera en ellas su carga terapéutica.

En resumen, a lo largo de este apartado se ha comprobado que la nanomedicina está poniendo en nuestras manos herramientas con las que se podrían lograr tres de las aspiraciones clásicas en la práctica clínica: ofrecer a cada paciente una medicina personalizada, ajustar exactamente la dosis de cada fármaco a las necesidades del enfermo, y dirigir con precisión y eficiencia los principios activos a los puntos concretos del cuerpo donde deben actuar. De hecho, los nanosistemas dispensadores de fármacos actuales son las aproximaciones más cercanas al concepto de «balas mágicas» propuesto hace un siglo por P. Ehrlich, el padre de la quimioterapia moderna. No obstante, a pesar de las buenas perspectivas que se derivan de la experiencia en cultivos celulares, en animales de laboratorio y en los primeros ensayos clínicos, hay que ser muy cautos antes de generalizar su uso en medicina. En la actualidad se están llevando a cabo ensayos en los que se analiza la posible toxicidad que alguno de estos vehículos (en particular, las nanopartículas metálicas) podría tener en nuestro organismo, los efectos secundarios producidos a distintas dosis, su estabilidad en diferentes fluidos biológicos y las reacciones que desencadenan en nuestro sistema inmune. Como se expondrá en el Capítulo 8, la bioseguridad es una condición imprescindible para la incorporación definitiva de la nanotecnología a la medicina.

7.11. Los nanorrobots del futuro

En el apartado anterior hemos visto que distintos tipos de nanosistemas pueden actuar como «nanosubmarinos» dispensadores de fármacos dentro de nuestro cuerpo. Ya que esto es posible, llevando la tecnología hasta el extremo podríamos preguntarnos si sería esperable que también lleguen a desarrollarse «nanorrobots» con funciones terapéuticas. Tales nanorrobots o *nanobots* fueron propuestos por K. E. Drexler en 1986, en su obra *Engines of Creation: the coming era of nanotechnology*. Este libro imagina un futuro en el que distintos tipos de nanomáquinas (totalmente artificiales, o mixtas entre nanoestructuras artificiales y biomoléculas), con un tamaño menor o igual a nuestras células, podrían circular por el organismo para mejorar sus capacidades, destruir células cancerígenas, eliminar patógenos, o reparar rápidamente el daño sufrido en cualquier tejido.

En el mundo «micro» ya se han dado pasos hacia esa aún lejana meta. Por ejemplo, ingenieros y médicos del Real Instituto de Tecnología de Melbourne en Australia han inventado un micromotor que, con un tamaño de 250 μm , es capaz de navegar por las arterias cerebrales en busca de obstrucciones y aneurismas, tirando de un catéter al que guía hasta el punto exacto en el que debe actuar. Su uso podría aumentar la eficiencia en

las intervenciones de neurocirugía, y reduciría el daño producido en los vasos sanguíneos cuando un catéter se introduce por ellos de forma convencional.

Evidentemente, para llegar al nanomundo se requeriría que las máquinas construidas tuvieran dimensiones entre mil y diez mil veces menores. Así, por el momento los nanorrobots son sólo ficción y no realidad. No obstante, merece la pena citar algunos de los que se han planteado durante los últimos años, principalmente por el grupo de R. A. Freitas (uno de los padres de la nanomedicina). Por ejemplo, han imaginado un dispositivo artificial que sería conceptualmente análogo a nuestros glóbulos rojos. Estas células, también llamadas eritrocitos o hematíes, tienen forma de disco bicóncavo de unos 7 μm de diámetro y son las encargadas de transportar oxígeno en nuestra sangre gracias a la presencia en ellas de la hemoglobina, una proteína que se une al oxígeno a través de un átomo de hierro que contiene (y que es el responsable del color de tales células y de nuestra sangre). Pues bien, el nanorrobot imaginado por Freitas se denomina «respirocito», tendría un diámetro de 1 μm y estaría dotado con la capacidad de almacenar y liberar hasta 236 veces más O_2 que un glóbulo rojo (Figura 7.12A). Llevaría incorporados sensores químicos y de presión, y podría activarse y manipularse empleando ultrasonidos. Se ha llegado a proponer que una inyección de respirocitos nos permitiría vivir con el corazón parado durante cuatro horas o, sin llegar a esos extremos, contener la respiración (por ejemplo, para bucear «a pulmón») durante dos horas y media.

Otro curioso nanorrobot imaginado por el grupo de Freitas es el denominado «microbívoro»: una especie de macrófago artificial que sería capaz de destruir cualquier microorganismo patógeno presente en nuestro torrente sanguíneo, con una eficiencia mil veces mayor que las células del sistema inmune (Figura 7.12B).

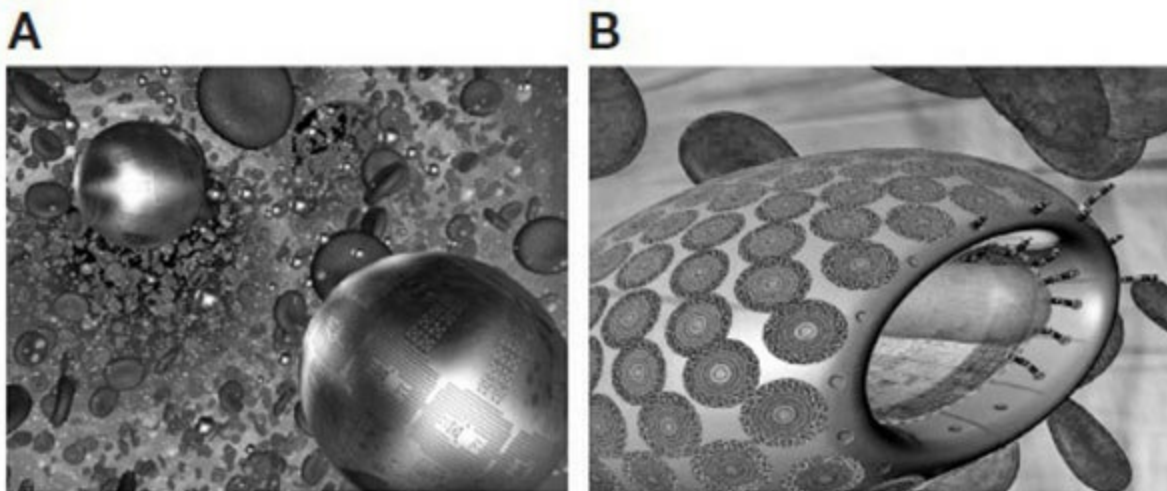


FIGURA 7.12. Dos ejemplos de nanorrobots que se han propuesto durante los últimos años, pero que no podrán ser viables con esas configuraciones: A, Respirocitos; B, Microbívoros. Imágenes de R. A. Freitas (Instituto de fabricación molecular, California, EE.UU.).

A pesar de lo espectacular de estas propuestas, es altamente improbable que lleguen a hacerse realidad algún día. La principal razón es que nuestro sistema inmune es el resultado de millones de años de evolución biológica, y durante ese tiempo la selección natural ha estado optimizando constantemente la sensibilidad y especificidad de las células que lo componen. La bionanotecnología está avanzando mucho en la construcción de nanodispositivos que imitan o incluso mejoran ciertas capacidades de los seres vivos, pero la robustez, adaptabilidad y versatilidad de los sistemas biológicos complejos (en este caso, el sistema inmune) es por el momento inalcanzable para los nanotecnólogos.

La nanociencia y la nanotecnología están poniendo en nuestras manos ideas y productos revolucionarios, y como hemos visto a lo largo de este capítulo muchos de ellos son cada vez más útiles en biotecnología y medicina. Pero en cuanto a los nanorrobots, nada de lo propuesto hasta ahora tiene visos de poder llegar a existir. Las leyes de la física se cumplen siempre, también en el nanomundo, y esto incluye lo relacionado con las leyes de escala. Como se comentó en el Capítulo 2, ningún nanorrobot podrá ser el equivalente a una máquina artificial de nuestro mundo reducida a dimensiones nanométricas. Si alguna vez llegan a existir, los nanorrobots probablemente se parezcan a las nanomáquinas naturales de las que hablábamos en el apartado 7.4, quizá asociadas a algún nanomaterial que las ayude a realizar una función concreta. Frente a la lógica y eficiencia que nos ofrecen las biomoléculas naturales y sus agregados, los textos de Drexler y Freitas sobre nanorrobots son, al igual que la famosa película *Viaje alucinante*, obras entretenidas e incluso sugerentes... pero situadas en el ámbito de la literatura, no en el de la ciencia.

— 8 —

**PERSPECTIVAS, APLICACIONES ACTUALES E
IMPLICACIONES SOCIALES**

—El coágulo está justo aquí. Es imposible llegar a él sin dañar el tejido circundante, lo que sería fatal para Benes. La única forma de alcanzarlo es a través del sistema arterial.

—La Fase Uno requiere miniaturizar un submarino, con su tripulación y el equipo quirúrgico, e inyectarlo por la arteria carótida.

—¿Cómo será de pequeño?

—Aproximadamente del tamaño de un microbio.

...

—Una vez que estemos en la carótida, continuaremos por el sistema arterial hasta alcanzar el punto afectado, donde el Dr. Duval intentará disolver el coágulo utilizando un rayo láser.

...

—¿Cómo sabremos dónde está el submarino en cada momento?

—El Dr. Michaels es un especialista en el sistema circulatorio y será su guía. Sabrá dónde están, y podrán comunicarse con él de forma inalámbrica. Además, el submarino es de propulsión nuclear: lo seguiremos como haríamos con cualquier marcador radiactivo.

Viaje alucinante, guión basado en un relato de Jerome Bixby y Otto Klement para la película dirigida por Richard Fleischer en 1966

8.1. La evolución de la tecnología y el conocimiento

Desde que la evolución de los primates condujo al origen del género *Homo*, hace unos 2,4 millones de años, las distintas especies que han ido surgiendo y desapareciendo dentro de nuestro linaje se han caracterizado por un progresivo desarrollo de su cerebro, asociado al uso cada vez más perfeccionado de todo tipo de herramientas. De esta forma, frente a los demás seres vivos cuya única opción es *adaptarse* al medio en el que crecen, nuestros ancestros comenzaron también a *modificar* dicho entorno. La especie *Homo sapiens*, surgida hace unos 200 000 años, ha sido la estrella indiscutible (para lo bueno y para lo malo) de la capacidad transformadora del mundo. Así, a lo largo de nuestra historia la evolución biológica ha convivido con la evolución cultural, y los avances tecnológicos han condicionado el progreso de la humanidad. Los primeros hitos de la tecnología fueron fundamentales pero estaban muy espaciados en el tiempo. Acelerando la cronología podemos destacar el uso intencionado de piedras o

palos como instrumentos, la talla de piedras, el control del fuego, la agricultura, la construcción de edificios y posteriormente de poblados o ciudades, la cerámica y la metalurgia.

En los últimos cuatro milenios de nuestra historia el avance ha sido continuo, y a ello contribuyó notablemente el origen de la filosofía occidental hace unos 2500 años. Así, desde que los filósofos presocráticos comenzaron a propugnar el paso del mito al logos, la visión progresivamente más racionalista ha ido desterrando (lenta pero inexorablemente) las explicaciones mágicas, míticas o religiosas de los fenómenos naturales. El avance del pensamiento racional tuvo un punto de inflexión en el Renacimiento, cuando se consolidó el método científico y se generalizó la comprensión del mundo basada en la razón. Desde entonces, los avances de la ciencia y la tecnología han crecido incesantemente, y a partir de la revolución industrial su desarrollo está siendo vertiginoso. No obstante, siempre ha existido una separación entre la tecnología y la sociedad, y esta distancia se ha hecho más palpable en la actualidad. Hoy en día no somos capaces de seguir el ritmo de las innovaciones tecnológicas que nos rodean, y menos aún de comprender los fundamentos científicos en los que están basadas.

Además de la continuada y creciente expansión del conocimiento, desde la aparición de la máquina de vapor a finales del siglo XVIII se ha producido un hecho curioso: los principales avances científico-técnicos se han ido agrupando en sucesivas «oleadas». Así, como describió en su modelo de ciclos u oleadas de conocimientos el influyente economista J. A. Schumpeter, se han ido alternando etapas de gran desarrollo en la ciencia y la tecnología con otras en las cuales los avances parecen estancarse (Figura 8.1). Durante esos «valles» se aprovecha la inercia del desarrollo económico anterior, mientras en los laboratorios se va fraguando el conocimiento que protagonizará la siguiente expansión. En las «crestas de la ola» que han condicionado el progreso de los dos últimos siglos encontramos la propia revolución industrial, la automoción, la aeronáutica, el petróleo, la industria química, la exploración espacial, la microelectrónica y la biotecnología. En la actualidad vivimos en el cénit de la informática y las comunicaciones, pero las olas llegan cada vez más rápido y antes de que ésta se empiece a desvanecer ya avanza hacia nosotros la siguiente: la de la nanotecnología. Además, en esta ocasión la ola trae consigo la convergencia con otras disciplinas, como veremos a continuación. Tales oleadas científico-tecnológicas pueden relacionarse, si se aplican a un sector concreto, con las «curvas S» de la innovación de las que se ha hablado en el Capítulo 5, en las cuales se pasa por una fase embrionaria, una etapa de crecimiento y maduración, para finalizar en una época de saturación.

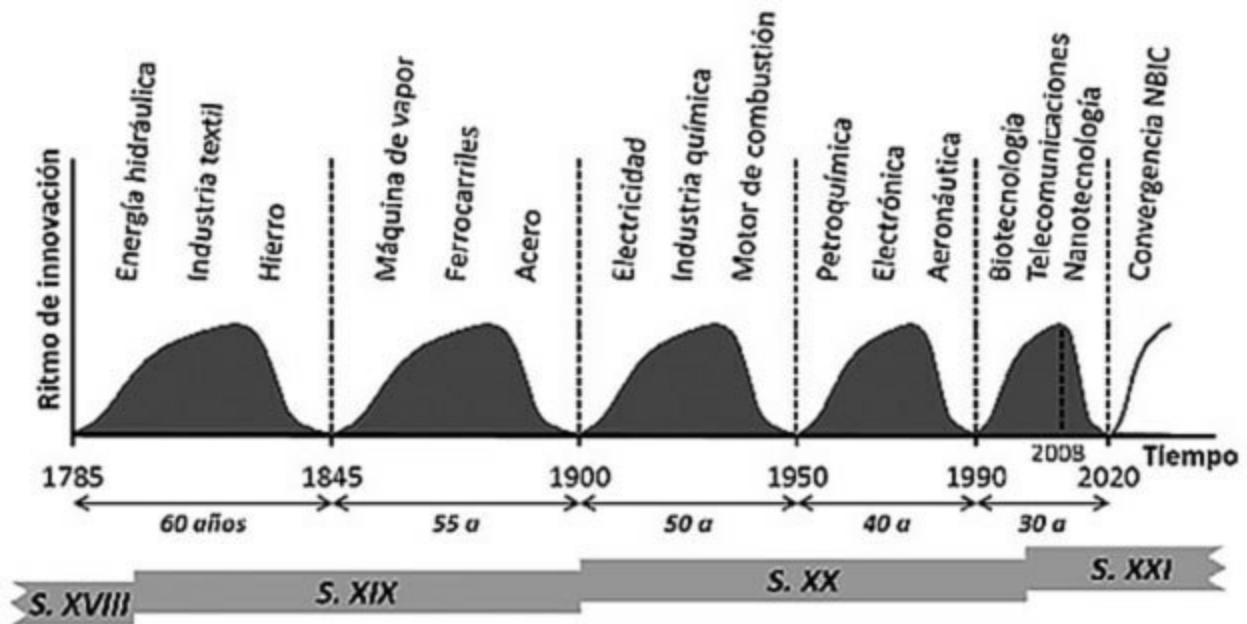


FIGURA 8.1. Representación gráfica del modelo de ciclos de conocimientos, propuesto por el economista J. A. Schumpeter. En cada oleada están indicados algunos de los avances tecnológicos que la protagonizaron.

Cada oleada de conocimientos científico-técnicos ha supuesto un revulsivo en la economía aportando notables mejoras en el conjunto de la sociedad, pero también ha tenido impactos negativos: contaminación, sobreexplotación de recursos, masificación de ciudades, creciente desigualdad social, carrera armamentística, deterioro medioambiental global, etc. Por tanto, esta experiencia acumulada debe guiar los desarrollos de la nanotecnología, que está llamada a modificar profundamente no sólo la industria y los materiales que nos rodean, sino también nuestra propia percepción e identidad como seres humanos.

8.2. La convergencia NBIC: Nano + Bio + Info + Cogno

Los diferentes temas que hemos ido tratando a lo largo de este libro muestran que la nanociencia y la nanotecnología tienen potencialidad para cambiar la forma en que vivimos. De hecho, ya han comenzado a hacerlo. Si además tenemos en cuenta que otras disciplinas, como la biotecnología o las ciencias de la comunicación, también se están desarrollando enormemente, nos encontramos ante una realidad incuestionable: en estos momentos, sin que aún podamos darnos cuenta, nuestra sociedad se está transformando profunda e irreversiblemente a un ritmo sin precedentes en la historia de la humanidad.

Por lo general, los cambios industriales más profundos que se han producido a lo largo del tiempo, las oleadas de conocimiento mencionadas anteriormente, se han

debido no únicamente al desarrollo espectacular de una determinada tecnología, sino a la convergencia de varias formas de pensar y trabajar provenientes de diferentes campos. Así, cuando dos o más disciplinas científico-técnicas interactúan con un objetivo común, las sinergias generadas hacen emerger conocimientos y metodologías experimentales que no hubieran surgido en cada ámbito por separado. Recordemos la gran cantidad de retos tecnológicos que se tuvieron que solventar para que el Apolo XI llegara a la Luna en un tiempo récord, o la cantidad de desarrollos complejos y especializados (como la creación de Internet) que fueron necesarios para que el CERN pudiese acelerar partículas a altísimas energías. Esta sinergia funciona muy bien en campos interdisciplinarios como la biotecnología, la ciencia de materiales, la astrobiología o, evidentemente, la nanotecnología. Otro caso que nos resulta familiar a todos es cómo la interacción entre la microelectrónica, las ciencias de la información y las telecomunicaciones ha dado lugar a la llamada «sociedad de la información» o «era digital». En ella vivimos, más conectados y globalizados que nunca, los «homo digitalis» a los que nos referíamos en el Capítulo 5.

En la actualidad estamos asistiendo al mayor y más complejo proceso de convergencia jamás producido, en el que se combinan los avances de cuatro disciplinas en principio poco relacionadas entre sí y con distinto grado de consolidación: la nanociencia y la nanotecnología (lo «Nano»), la biología molecular y la biotecnología (lo «Bio»), las tecnologías de la información y telecomunicaciones (lo «Info»), y las llamadas ciencias cognitivas incluyendo las neurociencias (lo «Cogno»). Esta interacción de los desarrollos «Nano+Bio+Info+Cogno», que abarca desde el nano— hasta el macromundo, se conoce resumidamente como «Convergencia NBIC» y es el resultado de un esfuerzo integrador iniciado por la Fundación Nacional de la Ciencia de Estados Unidos en el año 2001. La Figura 8.2 ilustra esquemáticamente el planteamiento de esta convergencia. Las entidades con las que se trabaja son las que corresponden a cada una de las cuatro áreas: átomos y moléculas, ácidos nucleicos y proteínas, bits y neuronas. La Convergencia NBIC también se ha denominado «Convergencia BANG», nombre mucho más sonoro que proviene precisamente de las iniciales de los términos Bits, Átomos, Neuronas y Genes.

Podemos preguntarnos si realmente esta suma de disciplinas tiene (o va a tener) algo que ver con el día a día de nuestras vidas, es decir, qué repercusiones prácticas son esperables de la convergencia NBIC. La respuesta es que sí tendrá consecuencias, y de hecho algunas ya se están produciendo a nuestro alrededor. Uno de los objetivos de esta convergencia tecnológica es construir nanobiodispositivos que incidan directamente sobre nuestra salud o sobre la interacción entre nosotros y nuestro entorno, de forma que estos generen la información necesaria que nos permita tomar decisiones

inmediatas. Así, por ejemplo, se plantea el desarrollo de nanobiosensores (descritos en el Capítulo 7) que se integren en nuestro cuerpo y permitan el seguimiento de la salud, realizando análisis de sangre y otros fluidos en tiempo real. Los resultados se enviarán mediante redes inalámbricas a un servicio médico situado en otro lugar, que si es necesario ordenará la liberación de un fármaco alojado en el propio dispositivo. En una versión más avanzada de esta propuesta dicho dispositivo nanométrico será capaz, mediante técnicas de inteligencia artificial, de tomar decisiones acerca de la liberación de fármacos cuando detecte valores anómalos de los parámetros medidos. Por el momento, estas promesas de la convergencia NBIC pueden sonar a pura ciencia ficción, pero algunos de los desarrollos comentados en los Capítulos 5 y 7 nos indican que vamos avanzando hacia tal objetivo.

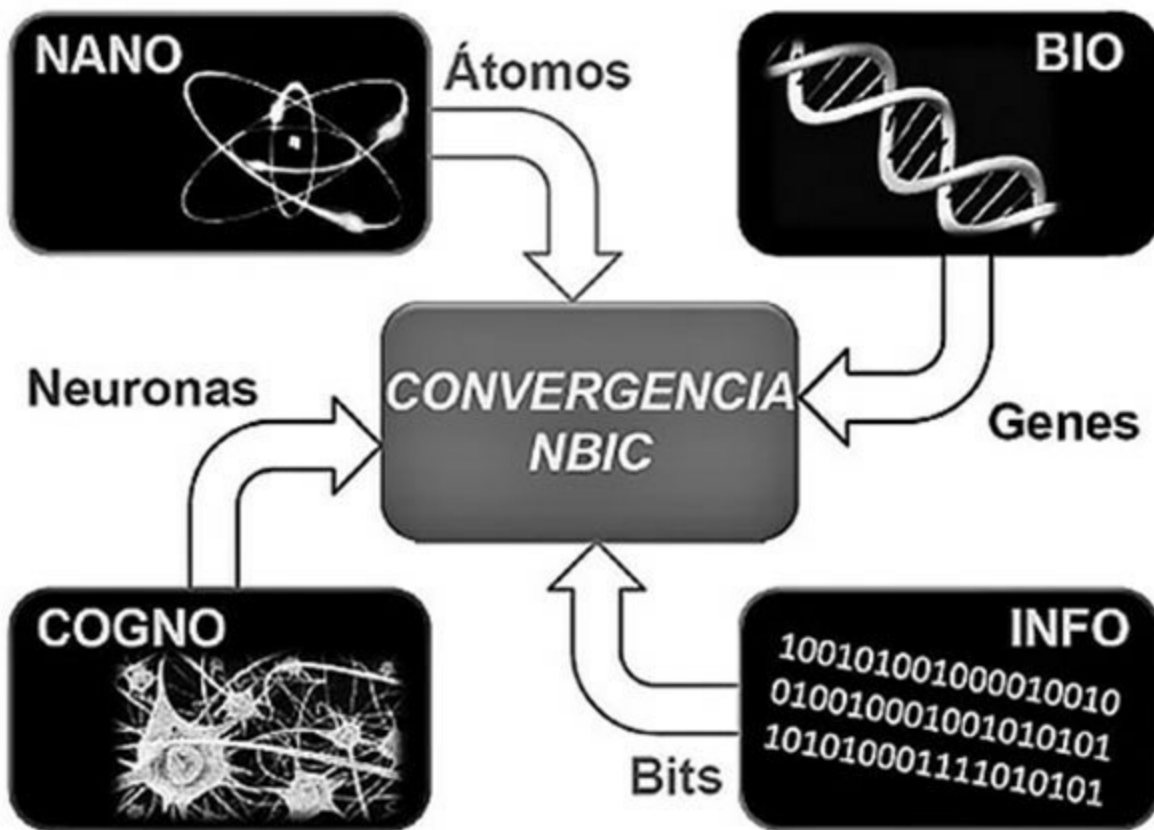


FIGURA 8.2. Representación esquemática de la Convergencia NBIC, con los campos científicos y entidades involucradas.

Otro planteamiento de la convergencia NBIC consiste en la fabricación de nanomateriales biocompatibles que posean propiedades electromecánicas similares a las de las fibras de proteínas que se encuentran en nuestras células musculares, lo que permitiría introducir tales sustancias en el cuerpo humano y mejorar la movilidad de personas con problemas de atrofia o discapacidad. Una alternativa menos invasiva

consistiría en que tales nanomateriales con capacidad contráctil estuvieran integrados en prendas de vestir diseñadas para las personas que las necesiten, a modo de un sistema «exomuscular». Además de su uso clínico, las aplicaciones de esos materiales para ayudar en trabajos que requieren mucha fuerza física serían evidentes. De hecho, ya se han propuesto por el Departamento de Defensa de los EE.UU. para el diseño de la futura vestimenta militar, que permitirá a los «supersoldados» cargar equipos muy pesados, recorrer grandes distancias sin sufrir agotamiento muscular, o ejecutar saltos inverosímiles. Sin duda, también podrían usarse ilegalmente para, por ejemplo, aumentar de forma deshonesta el rendimiento deportivo. Otro tipo de materiales biocompatibles podría utilizarse en la construcción de prótesis inteligentes capaces de regenerar un tejido u órgano afectado, informando del proceso al médico correspondiente, quien podrá estimular de manera controlada su biodegradación cuando la reparación haya terminado. La combinación de este tipo de ideas con los avances actuales en medicina regenerativa, asociada al uso de células madre, resulta esperanzador para un sinnúmero de patologías.

Llevando nuestra imaginación más hacia el futuro, todos estos desarrollos y muchos más podrían combinarse para generar una batería de nanodispositivos, aunque evidentemente no serán similares a los nanorrobots criticados en el capítulo 7 por ser sólo una «versión en miniatura» de los robots o máquinas de nuestro entorno. Los nanosistemas más realistas que se proponen para el futuro podrían inocularse en nuestro cuerpo en distintos momentos de la vida (al igual que ahora hacemos con las vacunas) y permanecerían en él, alojados estáticamente o bien recorriéndolo a través del sistema circulatorio. De esta forma, los nanodispositivos detectarían el exceso o carencia de determinadas sustancias propias del desarrollo del individuo a cada edad, controlando infecciones o reaccionando a la aparición de tumores de forma automática o supervisada. ¿Sería así posible luchar contra los distintos tipos de cáncer en sus fases más tempranas de desarrollo, y aplicar focalizadamente sobre ellos las mínimas dosis de quimioterapia necesarias? ¿Y si en lugar de actuar a posteriori interviniéramos sobre la primera célula que va a originar el tumor mediante terapia génica in situ? Estas preguntas pueden plantearse de una forma que hubiese parecido absurda solo cuatro párrafos más arriba: ¿podría estar en la convergencia NBIC el remedio contra el cáncer? ¿Y contra la enfermedad de Alzheimer? ¿Y contra el envejecimiento, proceso cuyas bases bioquímicas cada vez conocemos mejor? ¿Cuánto podría llegar a aumentar la esperanza de vida gracias a las tecnologías convergentes? ¿Podremos vivir 150 años? ¿Y 300? ¿Dónde está el límite?

El futuro de nuestras vidas y las de nuestros hijos puede tener mucho que ver con la respuesta a estas preguntas. De hecho, ya que el panorama que dibuja la convergencia

NBIC es tan esperanzador, también puede plantearse si gracias al aumento de nuestras capacidades físicas y mentales podríamos llegar a convertirnos en «superhombres» y «supermujeres»... o tal vez en una especie cada vez menos natural y más sintética, en la línea de lo que muchas novelas o películas han propuesto. Pero no sólo se ha hablado sobre ello en la ficción, ya que varios movimientos filosóficos, como el llamado Transhumanismo, propugnan que los avances tecnológicos podrían eliminar los aspectos indeseables de la condición humana, incluida la propia muerte. Si llegara ese momento, ¿todos los humanos disfrutarían de la posibilidad de convertirse en superhéroes o en seres inmortales? ¿O bien ese privilegio estaría reservado únicamente para los individuos más pudientes de los países más desarrollados, en un mundo definitivamente dividido en dos sociedades diferentes y enfrentadas? De hecho, ¿serían *dos sociedades*... o con el tiempo llegarían a ser *dos especies* distintas? Por otra parte, ¿en qué situación quedarían las religiones que fundamentan parte de su existencia en la promesa de una vida eterna después de la muerte? Una vez más, los avances tecnológicos y la integración de disciplinas ponen sobre la mesa interrogantes complejos, que van mucho más allá de la propia ciencia y entran en conflicto (o en convergencia) con corrientes filosóficas y religiosas que han acompañado al ser humano desde su origen más remoto.

8.3. El miedo a la nanotecnología

Diana de Poitiers fue una figura relevante de la aristocracia francesa del siglo XVI, conocida por ser amante del monarca francés Enrique II, que reinó desde 1547 hasta su muerte en 1559. Esto no tiene nada de particular, ya que los reyes de esa y otras épocas han tenido amantes reconocidas que han pasado a la historia como tales. Sin embargo, era menos normal que Diana fuese veinte años mayor que el propio Rey en lugar de ser, como ocurría habitualmente, una joven doncella. ¿Cuál era su secreto? Dicen que tenía una piel prodigiosa, con un aspecto mucho más joven que el propio de su edad (Figura 8.3). Ella, consciente de ese atractivo, intentaba mantener su piel clara y tersa tomando sales de oro disueltas, ya que al «oro líquido» (así se denominaba aquel brebaje) se le atribuían propiedades curativas y antirreumáticas, hasta el punto de que durante un tiempo se consideró el elixir de la juventud. En realidad, Diana estaba bebiendo una suspensión de nanopartículas de oro. ¿Eran éstas las responsables de su irresistible cutis de porcelana? ¿O por el contrario fue su ingesta lo que le produjo la muerte en 1566? La causa de su fallecimiento se había relacionado tradicionalmente con una

caída desde su caballo producida el año anterior. Pero, cuando en 2009 sus restos iban a ser trasladados al castillo de Anet, en Francia, los análisis científicos encontraron una concentración de oro anormalmente alta en los restos de tejidos y cabello: probablemente Diana falleció a causa de la anemia severa producida por una lenta intoxicación por oro. Eso sí, después de haber vivido sesenta y seis largos e intensos años.

Esta curiosa anécdota histórica nos lleva a destacar un hecho de gran relevancia actual para la nanotecnología: a pesar de los avances producidos, aún no es posible determinar los efectos a largo plazo de las nanopartículas en el cuerpo humano. Sin embargo, las nanopartículas forman parte de nuestro mundo cada vez más y, como veremos posteriormente, las de oro y las de plata se están comenzando a utilizar incluso en alimentación. Son muchos los problemas que deben ser abordados para estudiar científicamente si una nanopartícula u otro objeto nanométrico puede ser tóxico o nocivo. La principal limitación está relacionada con su tamaño, dado que se requiere tecnología muy sofisticada para detectar su presencia en los alimentos, en el agua que bebemos, en el aire que respiramos y en los tejidos u órganos de nuestro cuerpo. Además, no es fácil llegar a un consenso sobre la cantidad o concentración acumulada a partir de la cual se producen efectos indeseables en nuestra salud o en el medioambiente. De hecho, es sabido que todo compuesto químico puede llegar a ser tóxico dependiendo de la dosis. Fue precisamente un contemporáneo de Diana de Poitiers, el alquimista, médico y astrólogo suizo Theophrastus Bombast von Hohenheim, conocido como Paracelso, quien acuñó una frase que sigue vigente: «Todo es veneno, nada carece de veneno: solo la dosis hace el veneno».



FIGURA 8.3. El cuadro *Dama en el baño*, pintado por François Clouet en 1571, muestra a Diana de Poitiers, cuya admirada tez de porcelana quizá se debía a una anemia producida por la ingesta continuada de nanopartículas de oro. Esta obra se expone en la Galería Nacional de Arte, Washington, EE.UU.

En realidad, los humanos hemos vivido siempre en contacto con las nanopartículas, ya que algunas de ellas constituyen una forma natural de organización de la materia. Sin embargo, desde la aparición del motor de combustión el número de nanopartículas a nuestro alrededor ha crecido exponencialmente. De hecho hoy se reconoce el efecto nocivo de los gases emitidos por motores diésel debido precisamente a que en ellos hay

hollín que posee una elevada concentración de micro- y nanopartículas de carbono derivadas de la combustión del gasóleo, que por su tamaño (entre 100 nm y unas pocas micras de diámetro) escapan a los filtros presentes en los tubos de escape de los automóviles. Reflexionando sobre este ejemplo nos preguntamos: ¿cuántos de los productos, o subproductos, que circulan a nuestro alrededor pueden ser tóxicos debido a que poseen tamaño nanométrico?

Tanto en los laboratorios como en el día a día de nuestra vida, cuando manejamos cualquier tipo de compuesto debemos tener en cuenta su ficha de seguridad y sus normas de uso, que nos informan sobre cómo manipularlo y conservarlo, así como de los riesgos que puede entrañar su uso. Hay que tener en cuenta que un material que es sintetizado por vez primera en un laboratorio, tanto en formato «nano» como en formato micro o macro, evidentemente carece de ficha de seguridad. Por otra parte, las pruebas de toxicidad para cualquier sustancia siempre habrán sido elaboradas empleando su formato macroscópico, que no llega más abajo de las dimensiones mili- o micrométricas de los productos «pulverizados». Pero, ¿qué ocurre si el material forma, natural o artificialmente, disposiciones nanométricas con un diámetro de tan sólo 50 o incluso 10 nm? Por lo general, no lo sabemos. La materia se comporta de forma diferente en función de su tamaño. Este principio básico de la nanotecnología hace que una sustancia pueda no ser nociva en formato microscópico pero adquirir toxicidad cuando aparece en dimensiones nanométricas. En este caso los efectos de tamaño, de los que tan favorablemente hemos hablado en distintos apartados de este libro, se vuelven en nuestra contra. Además, nada excluye que una nanopartícula o cualquier otro nanomaterial en principio inocuo pueda generar toxicidad por acumulación, o bien convertirse en nocivo al combinarse con otras sustancias presentes en nuestro cuerpo o en el ambiente. Recientemente, una compañía multinacional farmacéutica ha realizado contratos de investigación con diversos laboratorios para estudiar el efecto del tamaño de las partículas nanométricas de óxido de zinc en sus cremas solares para protección de los rayos UV. El problema ha venido cuando se han encontrado nanopartículas en la sangre de bebés lactantes. No se ha demostrado la toxicidad de éstas, pero podemos estar de acuerdo en que su presencia en la sangre desde la más tierna infancia debería evitarse.

Los expertos definen el riesgo de un material como el producto de su peligrosidad intrínseca por el tiempo de exposición al mismo. Además, en el caso de los materiales que pueden penetrar en nuestro organismo, su riesgo también depende de la capacidad de ser bioabsorbidos a través de diversas vías, y de la presencia de sustancias potenciadoras o inhibidoras de dicha absorción. Es muy difícil poder definir cualquiera de estos factores cuando nos referimos a materiales en la nanoescala. De hecho, el

riesgo puede existir en muchos ámbitos: para los manipuladores de ese material, para los trabajadores que están en contacto habitual con él o para sus consumidores esporádicos. Además, la influencia sobre la salud es diferente en función de la edad de la persona, de su estado físico general y de las eventuales interacciones de dicho material con moléculas presentes en el organismo en un momento dado. Y en el caso de mujeres embarazadas, ¿pueden tener los nanomateriales algún riesgo específico para el embrión o feto que se está desarrollando? La mayoría de los interrogantes que estamos planteando no tienen, hoy en día, una respuesta clara.

Por otra parte, no debemos preocuparnos únicamente por nuestra salud, y es preciso también evaluar la toxicidad para los animales, las plantas, los hongos, o la vida microscópica que no podemos ver pero que está ahí, configurando nuestro medioambiente y permitiéndonos seguir vivos. Estas consideraciones ecológicas son fundamentales sobre todo en lo que respecta a la potencial toxicidad acumulativa. Aprender a evaluar con rigor científico y sin alarmismo el riesgo de los nanomateriales es una necesidad urgente, una condición necesaria para que los avances de la nanotecnología puedan llegar a nuestros hogares sin causar alarma. De hecho, se está empezando a utilizar el término de «nanotecnología responsable», que nos habla de la necesidad de realizar una gestión profesional y ética, capaz de controlar los riesgos potenciales derivados de la inmersión en el nanomundo.

Así, dado que los nuevos nanomateriales podrían resultar perniciosos para los humanos y para los demás seres vivos, es necesario adoptar estrategias que permitan utilizar y comercializar los productos derivados de la nanotecnología con la mayor seguridad posible. Lo más sencillo es aplicar el principio de precaución a la vez que se ponen en marcha estudios detallados y rigurosos del impacto de las nuevas sustancias (y de las ya conocidas) cuando se sintetizan en tamaño nanométrico. Estas investigaciones se agrupan en la disciplina denominada nanoecotoxicología, que resulta fundamental para que los consumidores tengan garantías sobre la inocuidad de los alimentos o productos de consumo. Para ello se requiere cuantificar constantemente diferentes magnitudes en la nanoescala, un ámbito de trabajo del que se ocupa la nanometrología. En la actualidad, diversos organismos europeos, norteamericanos, japoneses y chinos están realizando una intensa actividad en este campo, para garantizar que las medidas en la nanoescala se realizan de forma correcta, siguiendo protocolos claros y estandarizados a nivel mundial. La Organización Internacional de Estandarización (ISO) ha puesto en marcha un Comité Técnico denominado «TC 229» que hasta la fecha ha desarrollado casi una treintena de normas y definiciones sobre diferentes nanomateriales y la evaluación de sus riesgos. En España, la entidad que está involucrada en el desarrollo e implantación de esta normativa es la Asociación

Española de Normalización y Certificación (AENOR), con el importante papel que desempeña el Centro Español de Metrología (CEM).

Para finalizar esta sección, recordemos que las diferentes tecnologías que los humanos hemos ido desarrollando poseen aspectos positivos: asegurar nuestra supervivencia, mejorar la salud y las condiciones de vida, o expandir nuestro hábitat. Sin embargo todas ellas conllevan una serie de riesgos, que una vez conocidos se intentan minimizar tomando las medidas adecuadas. Un ejemplo muy familiar para todos lo encontramos en el automóvil, que ha sido un instrumento clave para el desarrollo de la sociedad en el último siglo. Sin embargo su uso no está exento de riesgos, y de hecho la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en el año 2000 hubo aproximadamente 1 260 000 muertes por accidentes de tráfico en las carreteras de todo el mundo. A pesar de ello esta tecnología resulta imprescindible en la sociedad actual, y sus riesgos se intentan minimizar con varios instrumentos: adecuados códigos de circulación, control del tráfico por los cuerpos policiales, normativa estricta en la fabricación de vehículos e implantación de elementos de seguridad (activos y pasivos) tanto en vehículos como en carreteras. De forma análoga, la nanotecnología del siglo XXI no será una excepción a esta dualidad riesgo-beneficio, y se irá incorporando progresivamente a nuestras vidas de una forma controlada. No hemos de tener un optimismo desmesurado que nos lleve a proponer los nanoproductos como la panacea para todos nuestros problemas, pero tampoco caer en el miedo irracional fruto de la desinformación o de una información sesgada.

8.4. Los esfuerzos por la regulación y la formación

Ante el nivel de incertidumbre que aún planea sobre la nanotecnología, debemos preguntarnos cómo se ve en la calle esta disciplina, qué esperanzas o temores despierta en el público que finalmente será el consumidor de los productos que genere. De hecho, en la actualidad la nanotecnología suscita miedos y provoca opiniones contrapuestas de la misma forma que en los años setenta lo hacía la ingeniería genética, o veinte años más tarde la clonación de animales. Los avances de la ciencia son cada vez más rápidos, y sus aplicaciones llegan a nuestras vidas antes de que hayamos comenzado a entenderlos. Así, la distancia entre los desarrollos científico-técnicos y la sociedad se hace cada vez mayor debido a que, además, la cultura científica del ciudadano medio lamentablemente no ha aumentado a pesar de vivir en un mundo globalizado e hipertecnológico. En la mayor parte de los casos, usamos la última versión de teléfono

móvil sin saber qué es la radiación electromagnética, nos comunicamos en las redes sociales sin entender cómo funciona Internet, o tomamos medicamentos desconociendo qué es una molécula. En el ámbito de la nanotecnología, esta distancia se hace aún más evidente. Como ejemplo, diferentes estudios estadísticos realizados en España durante la última década por la Unión Europea (los conocidos como «Eurobarómetros») muestran que menos de un 15% de los encuestados saben algo acerca de la nanotecnología o de sus aplicaciones. Tal desconocimiento preocupa enormemente a las autoridades científicas de los países desarrollados, que han iniciado una serie de programas para acercar la nanotecnología a la sociedad. De esta forma se espera que todos comencemos a entender los avances que van a condicionar nuestro futuro.

Uno de los proyectos que intenta informar y crear un espacio de debate sobre los avances en nanotecnología es el denominado *Proyecto de Nanotecnologías Emergentes (PEN)*, iniciativa estadounidense comenzada en 2005 para fomentar la colaboración entre investigadores, gobiernos y empresas en este ámbito. Gracias a este proyecto se están dando a conocer al público y a los consumidores los «nanoproductos» que pueden encontrarse actualmente en el mercado, y además se informa sobre los beneficios y los posibles riesgos relacionados con el desarrollo y la comercialización de la nanotecnología. En la Unión Europea (UE) se ha puesto en marcha el proyecto NANOLOGUE, cuyo objetivo es establecer un diálogo entre científicos, políticos, empresarios y sociedad civil para abordar los aspectos legales, éticos y sociales de las aplicaciones de la nanotecnología.

Por otra parte, la UE está priorizando la financiación de estudios que evalúen con rigor los posibles riesgos de la nanotecnología en todos los ámbitos. De hecho, la Comisión Europea adoptó en 2008 un Código de Conducta para la investigación responsable en los campos de la nanociencia y la nanotecnología. Dicho código establece siete principios básicos que deben cumplir las actividades de investigación y desarrollo en este campo: 1) Ser comprensibles para el público; 2) Ser seguras y éticas, y además contribuir al desarrollo sostenible; 3) Llevarse a cabo de acuerdo con el principio de precaución, anticipando sus posibles efectos; 4) Contar con una gestión transparente que garantice el derecho legítimo de acceso a la información por parte de los consumidores; 5) Cumplir las normas científicas más exigentes, incluyendo las buenas prácticas de laboratorio y la trazabilidad de los productos; 6) Poseer la máxima creatividad, flexibilidad y capacidad de planificación; y 7) Ser asumidas de forma responsable por los investigadores y los centros en los que éstos trabajan ante sus repercusiones sociales, medioambientales y para la salud humana. La propia Unión Europea puso en marcha el proyecto NANOCODE, que tiene como finalidad establecer la forma en la que dicho código de conducta es percibido, de cara a su implementación

en universidades, centros de investigación y empresas de los estados miembros.

Además del establecimiento de un diálogo social y de un código de conducta sobre la nanotecnología, la UE, EE.UU., y otros países han puesto en marcha numerosos proyectos para determinar las técnicas con las que se debe evaluar la toxicidad de los nanomateriales y para llevar a cabo tales análisis. Algunos de estos proyectos, de llamativos nombres, son los siguientes: NanoReTox, NeuroNano, Nanotransport, NanoSmile, Nanosustain, NanoMmune o Nanoimpact. Tal cantidad y variedad de iniciativas deja claro que se está haciendo un gran esfuerzo por saber qué efectos perjudiciales pueden tener los nanoproductos que llegan a nuestras vidas.

Más allá de los aspectos normativos, la implantación definitiva de las novedosas ideas de la nanociencia y la nanotecnología ha de vencer otros problemas no menos importantes, relacionados con su carácter marcadamente interdisciplinar. Para aprender sobre el mundo «nano» y para estar informado sobre sus avances, es necesario un cambio de mentalidad y el manejo simultáneo de la información que llega desde la química, la física, la biología, la ingeniería y la medicina. No estamos habituados a entornos tan complejos en los que diversas áreas de la ciencia y la tecnología tienen algo que aportar y mucho que compartir. Así, en el ámbito educativo la nanotecnología requiere una aproximación diferente a la habitualmente empleada en las universidades para la enseñanza de las materias científicas. Es por tanto necesario ofertar carreras o estudios realmente interdisciplinares, horizontales en vez de verticales, para poder formar nuevos investigadores activos e imaginativos en el ámbito del nanomundo. Conscientes de este reto, en 2011 la Universidad Autónoma de Barcelona fue la primera en ofertar en nuestro país un «Grado de Nanociencia y Nanotecnología», y es esperable que otras universidades lo hagan durante los próximos años.

En cualquier caso, la formación en temas relacionados con la nanociencia y la nanotecnología debería iniciarse en etapas educativas anteriores a la universitaria, de forma que ciertos contenidos de estas ramas del saber se impartiesen durante la educación primaria o secundaria. Con ello la mayor parte de la población tendría un cierto contacto con estas nuevas tecnologías antes de encontrarse en las estanterías de los supermercados con los productos derivados de ellas. Sin embargo, en el actual sistema educativo español la nanotecnología aparecía mencionada únicamente en una ocasión, en el capítulo dedicado a los nuevos materiales dentro de la asignatura «Ciencias para el mundo contemporáneo»... una asignatura que, de hecho, ha desaparecido en la última reforma educativa. Esta grave carencia resulta aún más preocupante si se compara con los programas dedicados a la formación en nanotecnología que se han puesto en marcha en EE.UU., Alemania, Japón o Taiwán. En estos países (que precisamente son la punta de lanza del desarrollo científico-

tecnológico mundial) se ha comprendido que la formación en nanotecnología resulta esencial para tener ciudadanos informados y consumidores exigentes, capaces de entender lo fundamental de lo que pueden encontrar escrito en la etiqueta de cualquier «nanoproducto». Tampoco hay que olvidar formar a los emprendedores del futuro, aquellos que utilizarán la nanotecnología para generar riqueza mediante empresas de base tecnológica.

Además de la necesaria formación a lo largo de todos los niveles educativos no hay que olvidar al público adulto que ya no va a acudir a las aulas, por lo que la divulgación en nanotecnología es un tema esencial. Dentro de la Unión Europea se han lanzado proyectos como NANOYOU, TIME FOR NANO y NANOCHANNELS, dedicados a la formación y divulgación de la nanociencia y la nanotecnología entre la población general. Por su parte, en EE.UU. la *National Nanotechnology Initiative* (NNI) ha puesto en marcha numerosas actividades de divulgación. En el contexto iberoamericano, la Red José Rodríguez Leite de Divulgación y Formación en Nanotecnología (NANODYF), financiada por el Programa CYTED, desarrolla y ofrece muchos contenidos divulgativos accesibles para el público general.

Un problema adicional para llegar a avanzar en nanociencia y nanotecnología viene de las administraciones que gestionan los programas de I+D+i. Habitualmente, las ayudas y subvenciones públicas priorizan los proyectos muy focalizados en ámbitos concretos de la física, la química, la biología u otras disciplinas. Con ello, los intentos de cualquier investigador por emprender caminos nuevos e interdisciplinarios, en la frontera entre las ciencias tradicionales, es visto por la administración y los evaluadores como una osadía o incluso como un intrusismo en campos que no son aquél en el que está previamente «etiquetado» el científico en cuestión. Ante este panorama, lograr financiación para un proyecto sobre nanociencia o nanotecnología se convierte en una auténtica heroicidad en muchos países. En España, por ejemplo, resulta sorprendente que haya habido muy pocas convocatorias en un tema como éste, que fue catalogado como «estratégico» en nuestro Plan Nacional de I+D+i. Afortunadamente, en el contexto de la UE sí existen ayudas específicas para proyectos sobre nanociencia y nanotecnología. Uno de los programas europeos más interesantes se denomina *Nanociencias, Nanotecnologías, Materiales y Nuevas Tecnologías de la Producción* (NMP) que ha formado parte del Séptimo Programa Marco (7FP) de Ciencia e Innovación, y en el que se incluían convocatorias que financiaban tanto propuestas muy novedosas y de alto riesgo como otras más cercanas a la aplicación en las que se espera llegar a un prototipo industrial. Durante los próximos años, en los países europeos la fuente de financiación principal para los proyectos relacionados con el mundo «nano» seguirá siendo transnacional, gracias a las iniciativas incluidas en el

programa de la UE denominado «Horizonte 2020» que va a protagonizar la ciencia de este continente entre 2014 y 2020. La nanotecnología se considera una de las seis líneas clave para que la UE pueda mantener o mejorar su competitividad a escala mundial.

8.5. Nanotecnología, sostenibilidad y medioambiente

Un importante ámbito de aplicación de la nanotecnología tiene que ver con su uso para luchar contra el cambio climático y así avanzar hacia la sostenibilidad global. Se está planteando el desarrollo de una «nanociencia verde», que permita crear nuevos materiales con tres características deseables: ser menos contaminantes, no generar residuos tras su uso, y reducir el consumo de energía. De hecho, la «etiqueta verde» en las nuevas aplicaciones nanotecnológicas es un requerimiento importante para que un producto llegue desde el laboratorio al mercado. El camino ya se ha iniciado y existen avances que están logrando gran popularidad. Por ejemplo, la sociedad ha asumido que mientras las bombillas convencionales de filamento incandescente convierten en luz tan solo el 5% de la energía eléctrica que consumen, las lámparas fluorescentes compactas (las conocidas como «bombillas de bajo consumo», ya habituales en nuestro entorno) y sobre todo los nuevos dispositivos luminosos conocidos como LEDs (de los que hablamos en el Capítulo 5), suponen no sólo un ahorro enorme en el consumo eléctrico, sino también una mayor duración y resistencia, ocupando menos tamaño.

La nanotecnología posee todos los ingredientes para convertirse en una disciplina impulsora del desarrollo sostenible. De hecho, según el Instituto Meridian de EE.UU., vinculado al Proyecto Objetivos de Desarrollo del Milenio establecido por la ONU, la nanotecnología podría (y debería) incidir al menos en las siguientes áreas: 1) Almacenamiento, producción y conversión de energía: la emisión de gases que contribuyen al calentamiento global (el dióxido de carbono y otros) puede reducirse notablemente si usamos nuevas fuentes de energía que incluyen nanomateriales, como las células solares de nueva generación o las pilas de combustible; 2) Descontaminación de la atmósfera: los gases tóxicos o nocivos (entre ellos el cianuro de hidrógeno o los óxidos de nitrógeno) pueden reducirse si en los procesos industriales se utilizan catalizadores basados en nanopartículas, nanotubos de carbono o materiales nanoporosos, que además pueden usarse en sistemas altamente eficientes para el confinamiento de gases; 3) Procesamiento y análisis de agua y alimentos: el uso de tecnologías basadas en nanofiltrado aumenta la eficiencia de los procesos de desalación y descontaminación de aguas destinadas al consumo, y es posible diseñar redes de nanosensores capaces de monitorizar a tiempo real distintos parámetros

presentes en el agua y los alimentos crudos o procesados; 4) Mejora en la producción agrícola: control de plagas mediante nuevos insecticidas nanoencapsulados, y desarrollo de nuevos sistemas de procesamiento y conservación de alimentos; 5) Análisis de los niveles de contaminación en el medioambiente: diferentes nanodispositivos pueden ayudar a monitorizar cualitativa y cuantitativamente las sustancias tóxicas presente en las aguas de ríos y mares, en el suelo e incluso en el interior de animales o plantas; 6) Diagnóstico de enfermedades, administración de fármacos y seguimiento de la salud de las personas, tal como se describe en el capítulo anterior; 7) Fabricación de materiales ligeros y muy resistentes, de utilidad en automoción y aeronáutica, como los basados en nanotubos de carbono: esto llevará a la producción de vehículos con menos consumo y, por tanto, menos contaminantes; y 8) Desarrollo de nuevos materiales y procesos para la construcción de edificios respetuosos con el medioambiente y de bajo consumo, dentro del espíritu de la denominada arquitectura sostenible o de «energía cero».

Como ya se ha mencionado anteriormente, alcanzar los objetivos de sostenibilidad pasa por determinar qué efecto podrían tener los nanomateriales liberados a la atmósfera, que posteriormente pueden acumularse en el suelo o en el agua, y acabar penetrando en las células de los organismos. En el caso de que tales materiales sean tóxicos en algún punto de ese proceso, habrá que investigar la mejor forma de eliminarlos, sin generar a su vez nuevas sustancias peligrosas para la salud o el medioambiente.

8.6. Productos en el mercado

La nanotecnología es una disciplina muy joven, pero ya posee una importante visibilidad en los medios de comunicación y ante los ojos de la sociedad. Quizá ello se deba a algo de lo que hemos hablado en distintos puntos de este libro: la mezcla de fascinación y temor que se siente al poder llegar hasta las entrañas de la materia. El ámbito de «lo nano» también resulta muy atractivo porque nos permite soñar con materiales o dispositivos con funcionalidades novedosas, en ocasiones combinando componentes naturales con otros artificiales. Como vimos en capítulos anteriores, hay quien habla incluso de llegar a construir seres vivos «pieza a pieza». Así, cada vez son más frecuentes los reportajes sobre nanotecnología en prensa escrita, radio y televisión. En Internet, si buscamos la palabra «*nanotechnology*» nos encontramos con varios millones de entradas, y más de un millón si introducimos el término en español. De hecho, es curioso comprobar cómo en foros, blogs y redes sociales la nanotecnología es

mucho más popular que las ciencias clásicas en las que se basa, como la física, la química o la biología. También es interesante constatar que muchas páginas web se dedican a prevenir a la población sobre los riesgos de la nanotecnología, pero de una manera alarmista y alejada de lo que debe ser un debate racional sobre este tema.

Entre tanta información (o, en ocasiones, desinformación) y una vez comentados los avances que promete la nanotecnología, en este apartado vamos a resumir lo que ya es plenamente *real*: los productos más interesantes que actualmente se están diseñando, produciendo y comercializando. Muchos ya están en mercados y escaparates... aunque sus constituyentes escapen a nuestra vista. En cualquier caso, es evidente que hoy en día se abusa del término «nano» para sugerir que un producto es muy novedoso o moderno, o bien para dar a entender que en su desarrollo se han empleado avanzadas técnicas de investigación. Esto hace difícil, a primera vista, distinguir los verdaderos nanoproductos de los que no lo son.

Como se ha indicado en capítulos anteriores, las aplicaciones de la nanotecnología que más rápidamente se han hecho un hueco en la industria son los nanomateriales y nanodispositivos electrónicos. Hay cientos de empresas dedicadas a producir nanocomponentes o nanomateriales, que otras compañías incluyen en sus bienes de consumo para dotarlos de ventajas competitivas. Incluso en EE.UU. ya existen índices bursátiles que agrupan a las empresas dedicadas a la nanotecnología cotizadas en Wall Street o en Nasdaq. Según el inventario que se puede encontrar en la página web del proyecto PEN, del que ya hemos hablado anteriormente, en la actualidad hay cerca de 1500 productos con origen nanotecnológico en los mercados. Así, se estima que el negocio mundial de la nanotecnología acumuló ventas por valor de 225 000 millones de dólares en 2009, una cifra que ha ido creciendo durante los años siguientes. En España, la Fundación Phantoms editó a finales de 2013 una guía según la cual eran 96 las empresas que en ese momento trabajaban en el ámbito de la nanotecnología. Tanto dentro como fuera de nuestras fronteras, los principales productos comercializados actualmente son nanopartículas de distinto tipo y otros nanomateriales, sistemas para el encapsulado de fármacos o nutrientes, y dispositivos electrónicos. En la Figura 8.4 se muestran cinco ejemplos de productos que contienen nanomateriales de distintos tipos, y a continuación comentamos los nanoproductos de mayor interés agrupados por sectores.



FIGURA 8.4. Diversos productos que pueden encontrarse en el mercado con componentes derivados de la nanotecnología: Raqueta Organix V1 MP, de Vökl®, que incorpora nanotubos de carbono (<http://www.voelkl-tennis.com>). Bicicleta Racemaster SLX01, de BMC®, cuyo cuadro está fabricado con un composite basado en nanotubos de carbono (<http://www.bmc-racing.com/>). Crema de día Fullerene C60, de Zelens®, que contiene fullerenos en su formulación (<http://www.zelens.com/>). Filtro solar Optisol, de Oxonica®, con nanopartículas de dióxido de titanio (www.oxonica.com). Camiseta del C. D. Numancia, de Erreà Sport®, en cuyo tejido se incluyen nanopartículas de plata y titanio (<http://www.errea.it>)

Uno de los campos en los que la nanotecnología ha entrado con más fuerza es el del equipamiento deportivo, con la aplicación de los llamados nanocomposites. Como ya se explicó en el Capítulo 6, estos materiales están formados por dos o más constituyentes, en los que al menos uno de ellos presenta dimensiones nanométricas. El uso de nanocomposites ofrece una notable mejora de las propiedades físicas (dureza, resistencia a la fricción, peso, etc) con respecto a cada componente por separado. Así, tales compuestos se utilizan para fabricar bastones de montaña y de esquí, palos y pelotas de golf, arcos profesionales, mástiles de embarcaciones a vela o ropa deportiva. Por ejemplo, las empresas Babolat y Vökl comercializan raquetas de tenis que incorporan nanotubos de carbono, con lo que se logra un incremento en prestaciones mecánicas en paralelo a la disminución del peso (Figura 8.4). Otra

aplicación exitosa de los nanotubos es la bicicleta diseñada por la empresa suiza BMC, cuyo cuadro pesa menos de un kilogramo y además mejora considerablemente su resistencia a deformaciones. También se emplean nanotubos en la fabricación de bastones de hockey y bates de béisbol. Por otra parte, los fullerenos ya se están utilizando por la empresa japonesa Nanodesu para recubrir las bolas que se utilizan en el juego de bolos y así disminuir su fricción con la pista.

En la industria de la automoción, los nanocomposites están siendo crecientemente empleados en la fabricación de elementos estructurales y carrocerías de vehículos. En España, la empresa Avanzare posee plantas de producción de nanopartículas y otros nanomateriales que ya están presentes en los coches que conducimos. Otras empresas han puesto en el mercado vidrios con nanopartículas hidrófobas, gracias a las cuales no se empañan y son así útiles para su uso en espejos y lunas de automóviles (además de en gafas de distinto tipo). También existen vidrios que incorporan nanopartículas capaces de bloquear el paso de la radiación a diferentes longitudes de onda, evitando así el calentamiento de los vehículos. Por otra parte, uno de los productos que comercializa la empresa británica Oxonica, Envirox, contiene nanopartículas de óxido de cerio que actúan como catalizador en automóviles, contribuyendo así a la reducción de las emisiones y al ahorro de combustible.

El sector de la electrónica y los electrodomésticos se está comenzando a beneficiar del desarrollo de la nanotecnología, con nuevos materiales y dispositivos como los indicados en el Capítulo 5. Tales avances están llamados a revolucionar los ordenadores, las pantallas de televisión y los reproductores de sonido e imagen. Un ejemplo (más modesto, pero ya comercializado) de la llegada de la nanotecnología a este campo son los auriculares fabricados con polímeros que contienen nanopartículas capaces de repeler la grasa de la piel y evitar que los dispositivos electrónicos se ensucien. Además, los electrodomésticos más modernos que tenemos en nuestros hogares incorporan también nanoproductos en los materiales con que han sido contruidos. Como ejemplo relevante, distintos sistemas de filtrado de aire acondicionado y neveras utilizan ya nanopartículas de plata con propiedades bactericidas, por lo que ayudan a disminuir la probabilidad de propagación de patógenos como *Legionella* o *Salmonella*. Otro aspecto que debe destacarse es que varias empresas españolas lideran el mercado de la producción de grafeno, material en el que se han depositado enormes expectativas. Esto coloca a nuestro país en una posición privilegiada que debemos aprovechar.

En el caso de la industria textil y la moda, la nanotecnología está avanzando hacia la fabricación de tejidos más resistentes, repelentes de la suciedad o autolimpiables, absorbentes de la radiación ultravioleta, e incluso dotados de propiedades

antibacterianas o antifúngicas. Por ejemplo, se comercializa ropa interior fabricada con algodón que ha sido impregnado con nanopartículas obtenidas de la carbonización del bambú: tales nanopartículas aportan propiedades desodorantes y desinfectantes, que no se ven disminuidas con los repetidos lavados de la prenda. La empresa italiana Erreà Sport incorpora nanopartículas de titanio y de plata en las fibras con las que produce prendas deportivas, por lo que éstas se ensucian menos y evitan el crecimiento de bacterias u hongos. Ya se equipan con esta marca los futbolistas de clubes italianos como el Parma o el Atalanta, ingleses como el Middlesbrough, o españoles como el C. D. Numancia (Figura 8.4). Por otra parte, ya está en desarrollo una nueva generación de «prendas inteligentes» que podrán cambiar de color, brillo o textura en función de estímulos producidos por la persona que la viste o por quien interacciona con ella «desde fuera». Esto puede llegar a conseguirse incorporando sensores que detectan nuestra temperatura, parámetros de salud, o incluso el estado de ánimo o el nivel de estrés. Los tejidos podrían llegar a contener nanocápsulas capaces de liberar de forma controlada fármacos, perfumes o cremas. Así, tal vez durante la próxima década vistamos prendas que llegarán a decir sobre nosotros mismos mucho más que nuestros rostros.

En el ámbito de la biomedicina y la biotecnología se han desarrollado «nanopartículas esterilizadoras», cuya superficie está funcionalizada con moléculas que les permiten unirse a la pared exterior de determinadas bacterias contaminantes del aire. Así, si se vaporiza una preparación de esas nanopartículas en un recinto cuyo aire se desea purificar y esterilizar (por ejemplo, un quirófano), el spray entra en contacto con las bacterias que están en suspensión y las inactiva. El propio material quirúrgico que utilizan los cirujanos, así como las lámparas y mobiliario de los quirófanos, están también beneficiándose de las mejoras que aportan los nanomateriales. También se han desarrollado nanomateriales para obtener prótesis más resistentes y biocompatibles, nanosoportes biodegradables y bactericidas para facilitar el crecimiento de huesos y cartílagos, y geles basados en péptidos (polímeros cortos de aminoácidos) nanoestructurados que logran detener hemorragias en pocos segundos. También se comercializan nuevos vendajes y apósitos que incluyen nanopartículas bactericidas. Más allá de las nanopartículas, la nanotecnología se utiliza también para fabricar sistemas de esterilización de agua y aire en hospitales que están basados en nanofibras capaces de repeler las bacterias y los virus con mucha mayor eficiencia que las membranas tradicionales. Nuestra salud, por tanto, comienza a estar en manos de los desarrollos nanotecnológicos. Y también la salud sexual, ya que en la Universidad de Manchester se están desarrollando (con apoyo de la Fundación Bill y Melinda Gates) preservativos de grafeno en los que este material aporta mayor resistencia y a la vez

evita la disminución de placer característica del látex y otros materiales convencionales.

Los productos cosméticos tampoco se escapan de la revolución nanotecnológica. De hecho, la cosmética es el ámbito de consumo en el que más rápido comenzó a prosperar la nanotecnología, y numerosos productos están ya en el mercado: cremas revitalizantes que incluyen liberadores nanoporosos de sustancias como colágeno o vitaminas, sombras de ojos y pintalabios con nanopartículas de dióxido de titanio o dióxido de zinc, esmaltes de uñas con nanopartículas magnéticas que en presencia de campos magnéticos dibujan llamativas figuras, pastas dentífricas con nanopartículas que permiten una mejor fijación de flúor en el esmalte dental, champús que utilizan nanopartículas para reparar cabellos dañados, mascarillas faciales, etc. Un ejemplo concreto que podemos encontrar en farmacias y droguerías (Figura 8.4) es la línea de productos que la empresa Zelens comercializa con el significativo nombre de Fullerene C60, en los que se aprovecha el poder antioxidante de su ingrediente estrella. También están a la venta variantes del producto Optisol, de la ya mencionada empresa Oxonica, que contiene nanopartículas de dióxido de titanio capaces de absorber la radiación ultravioleta y por tanto mejorar los protectores solares o maquillajes. En cualquier caso, hay que destacar que la abundancia de nanoproductos en cosmética se ha producido, en parte, por lo poco exigente que es la normativa en este campo en comparación con los sectores de la medicina o de la industria alimentaria.

En el campo de la alimentación, la nanotecnología está ya presente en las diferentes fases de la larga cadena que, desde su origen hasta nuestra cocina, siguen los productos que comemos o bebemos. En cuanto a la producción, se están desarrollando nanosensores para controlar las condiciones del suelo agrícola y del agua de ríos y mares, así como para seguir el crecimiento y grado de maduración de las cosechas. Respecto al procesamiento, desde hace varios años se utilizan nanopartículas o se preparan micro- y nanoemulsiones para controlar la textura de los preparados alimenticios y la viscosidad de harinas, salsas u otros productos. Productos lácteos y huevos enriquecidos con el popular omega-3 (un ácido graso poliinsaturado que abunda en el pescado, y que en medios acuosos puede formar emulsiones con tamaño de gota en torno a 100 nm) o chicles con sabor a chocolate (que incorporan nanocristales de aceites de cacao) son ejemplos de «alimentos funcionales» con propiedades mejoradas. A medio camino entre la alimentación y la farmacología, se investiga sobre nanocontenedores que pueden permitir una mejor dosificación y absorción de los alimentos, tanto por vía oral como parenteral. La nanotecnología también está contribuyendo, gracias a la inclusión de nanopartículas en distintos tipos de polímeros, al desarrollo de envases más ligeros, aislantes y protectores, así como de utensilios de

cocina más resistentes, autolimpiables y con superficies difícilmente colonizables por bacterias u hongos. Se investiga además en la utilidad de nanopartículas fluorescentes funcionalizadas con anticuerpos para detectar la aparición de procesos de descomposición durante el almacenamiento de los alimentos, o bien la presencia de aditivos químicos indeseados. En un futuro cercano se usarán nanosensores biodegradables dentro del propio envase, lo que permitirá evaluar su frescura, cuantificar su grado de humedad, y controlar si se ha mantenido la cadena de frío requerida en cada caso.

En el ámbito de la enología, en la actualidad se están usando experimentalmente nanopartículas de plata para sustituir a los sulfitos que habitualmente se emplean como compuesto bactericida y antifúngico durante la elaboración del vino. ¿Cómo reaccionarán los consumidores ante una buena botella de Ribera del Duero, Rioja o Burdeos, en cuya etiqueta se pueda leer «Contiene nanopartículas»? Quizá en principio no muy positivamente, pero ¿tal vez mejoraría la sensación, e incluso se aumentaría el *glamour* del producto, si se especifica que tales nanopartículas son «de plata»? Esta pregunta puede parecer extraña, pero en el párrafo siguiente leeremos algo aún más sorprendente. En cualquier caso, con objeto de mejorar la conservación del vino, nanopartículas similares se pueden incluir también en los polímeros nanoporosos que desde hace años se utilizan para tratar de imitar el corcho natural. Por cierto, como nota curiosa podemos añadir que la nanotecnología también puede venir en nuestra ayuda en caso de que el consumo de alcohol haya sido excesivo: investigadores japoneses y norteamericanos han desarrollado nanocápsulas compuestas por polímeros orgánicos que contienen en su interior las dos principales enzimas que nuestro organismo utiliza para metabolizar el etanol... y su uso experimental en ratones ha demostrado que logran disminuir la concentración de alcohol en sangre hasta eliminar los efectos de las borracheras. En conjunto, dado que las aplicaciones en el ámbito alimentario han comenzado a ser tantas y tan variadas, la Autoridad Europea en Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Agencia de EE.UU. de Fármacos y Alimentos (FDA) están articulando una abundante normativa (también en desarrollo en otros países) para evaluar y regular las aplicaciones de la nanotecnología en agricultura y alimentación.

En la interfase entre la alimentación y la cultura nos encontramos con la gastronomía, un ámbito en el que la nanotecnología permitirá en breve desarrollar «alimentos interactivos» o «programables» gracias a la incorporación de nanocápsulas similares a las descritas, pero que en este caso contendrán una serie de aditivos capaces de proporcionar diferentes características organolépticas a un mismo alimento base. Dichas sustancias se podrán liberar mediante el aumento de temperatura o de presión (o incluso aplicando campos magnéticos externos), de forma que según el

tratamiento al que sometamos al alimento podremos sorprendernos con los distintos sabores encerrados (nunca mejor dicho) en él. Varias empresas del sector de la alimentación han mostrado su interés por desarrollar este nuevo tipo de alimentos, que sin duda superarán en posibilidades a lo que hasta ahora se ha logrado con la llamada «gastronomía molecular». Así, gracias a la nanotecnología, el interés de cocineros como Ferrán Adrià o Pierre Gagnaire por combinar la gastronomía con los avances científico-técnicos puede producir resultados aún más creativos y sorprendentes. Como postre para esta incursión en el mundo de la gastronomía comentaremos que el restaurante Serendipity 3 de Nueva York entró en 2008 en el *Libro Guinness de los récords* por ofrecer el dulce más caro del mundo: el helado llamado Frozen Haute Chocolate. Este postre está preparado con, entre otros ingredientes, 28 tipos de cacao llegados desde catorce países del mundo. Pero lo más sorprendente es que además contiene 5 g de «oro comestible» de 23 kilates, incluyendo fragmentos de láminas micrométricas de este metal (el «pan de oro» usado en artes decorativas desde hace siglos) y «nanoescamas» (Figura 8.5). El precio de este helado es de 25 000 dólares por ración, superando con creces al Golden Opulence Sundae, otro helado con oro que el mismo restaurante ofrece desde 2005 por «sólo» 1000 dólares. Sin duda, este manjar habría sido el elegido por Diana de Poitiers para terminar una romántica cena con su amante.



FIGURA 8.5. Una ración de Frozen Haute Chocolate, en su (como no podía ser menos) lujosa presentación: un auténtico broche de oro para cualquier experiencia gastronómica (imagen tomada de <http://www.serendipity3.com>).

La nanotecnología también proporciona materiales que resultan muy útiles en las artes plásticas y decorativas. De hecho, como ya se comentó en el Capítulo 6, la presencia de nanopartículas metálicas en los pigmentos empleados para colorear el vidrio utilizado en las vidrieras artísticas ha producido resultados bellísimos desde la Edad Media. En la actualidad, el desarrollo de distintos tipos de nanopartículas es muy útil para la pintura, ya que dotan a los pigmentos de mayor resistencia y durabilidad. Además, se está trabajando con nanomateriales que permiten a los recubrimientos modificar su color, luminosidad o reflectividad en función de cambios controlables en la temperatura, presión o iluminación incidente, o bien mediante la aplicación de una pequeña corriente eléctrica. La artista japonesa S. Kodama utiliza en sus obras ferrofluidos formados por nanopartículas magnéticas que permiten dar forma a hermosas esculturas líquidas que evolucionan en presencia de campos magnéticos. Las

aplicaciones técnicas y creativas que estos avances podrán tener en pintura y escultura son inagotables, ya que una obra de arte podrá adaptarse al espacio en el que se encuentra y también interaccionar con el espectador. Además, los desarrollos de la nanoelectrónica seguirán proporcionando nuevos soportes a los creativos que trabajan en «arte digital», dadas las enormes posibilidades que los nanodispositivos ofrecen tanto a los artistas como al público que contempla/recrea la obra.

Por último, en arquitectura e ingeniería los nuevos nanomateriales que combinan ligereza con gran resistencia permiten construir estructuras mucho más arriesgadas e imaginativas que las realizadas con materiales convencionales. Todas las ventajas que ya aporta la fibra de carbono (un material basado en el mundo micrométrico) podrán incrementarse extraordinariamente con el uso de nanotubos de carbono, grafeno u otros nanomateriales. Con ellos será posible obtener nuevos cementos y hormigones, más ligeros y con prestaciones espectaculares. Un nuevo mundo de posibilidades constructivas y creativas se abre ante nosotros, cuyos límites quizá solo dependan de la imaginación de arquitectos e ingenieros.

Como conclusión de este apartado, resulta evidente que numerosos y variados nanoproductos están llegando al mercado desde hace algunos años. No obstante, hasta el momento existe un sesgo hacia las aplicaciones pasivas de los nanoproductos, que se benefician de las mejoras que producen en las características físico-químicas de los materiales, como su resistencia, dureza o hidrofobicidad. Mientras que en cosmética ya abundan los nanoproductos disponibles comercialmente, en los campos de la medicina y la alimentación éstos van llegando a nuestras vidas con un cierto retraso debido a la estricta normativa y control que deben aplicarse. Y en otros ámbitos como los de la electrónica y las tecnologías de la información (ver Capítulo 5) aún estamos lejos de que los nanoproductos basados en nanotubos de carbono, grafeno o moléculas tomen el relevo de la nanotecnología basada en silicio. No obstante, durante los próximos años probablemente se acelerará el ritmo de llegada de todos los nanoproductos desde el laboratorio al escaparate.

8.7. El nanomundo en la cultura

La ciencia y la tecnología no son nunca disciplinas aisladas de todos los procesos que ocurren en la sociedad en la que se desarrollan, sino que forman parte de la realidad cultural de cada época. De hecho, cada vez es más frecuente (y necesario) el diálogo entre los tres pilares sobre los que se asienta ese edificio que denominamos cultura: las humanidades, las artes y las ciencias. Esta idea está en la base de un movimiento que

triunfa dentro y fuera de la red, conocido como «Tercera Cultura» o «Cultura 3.0». Sin profundizar en los fundamentos teóricos que subyacen a este diálogo interdisciplinar, algo que sí resulta evidente es que cada vez hay mayor permeabilidad entre los avances científicos y el resto de la cultura. Y esto es especialmente cierto en el caso de la nanociencia y la nanotecnología. En primer lugar, porque muchos de los nanomateriales o nanodispositivos producidos se pueden incorporar al proceso de obtención de diferentes productos culturales, tal como se ha mostrado en la sección anterior para el arte, la moda o la gastronomía.

Además, la ciencia supone una inagotable fuente de inspiración para disciplinas como las artes plásticas, la literatura, el cine o el cómic. En esa línea, ya el poeta romántico inglés Samuel T. Coleridge decía que solía asistir a clases de química en la Real Institución de Londres simplemente «para enriquecer su repertorio de metáforas». En este ámbito las posibilidades que ofrece la nanotecnología resultan evidentes, ya sea para plasmar artísticamente los fascinantes territorios del nanomundo, para imaginar viajes a través de él, o para proponer nanorrobots con capacidades inquietantes y que podrían incluso originar una nueva raza inmortal.

Algunos de los nanopaisajes que sirven de inspiración a muchos artistas, y que permiten establecer conexiones entre las artes plásticas y la nanotecnología, se dan a conocer en el concurso internacional de imágenes de microscopía de campo cercano (SPMAGE), o en el certamen español FOTCIENCIA convocado anualmente por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). En varias de estas imágenes descubrimos montañas escarpadas, lagos imposibles en los que se reflejan planetas en miniatura, enigmáticas formaciones cilíndricas apiladas formando curiosas geometrías, estructuras perfectas que se repiten hasta perderse en el horizonte, cuevas misteriosas, escamas, laberintos. Un ejemplo de estos nanopaisajes se muestra en la Figura 8.6. Los artistas que se inspiran en la nanotecnología nos descubren formas insospechadas. Y algo mucho más sugerente: nos permiten pasear por la piel de la materia.

En la literatura y el cine, la ciencia ficción se ha nutrido de imágenes del nanomundo y referencias a la nanotecnología desde antes incluso de que este campo de investigación se conociera como tal. Así, con la ventaja de no requerir científicos ni tecnólogos de por medio, la imaginación de los creadores ha tomado ideas de la nanotecnología para «construir» sensores diminutos y ultrasensibles, sofisticadas prendas inteligentes, impresionantes sistemas de comunicación y, por supuesto, nanorrobots capaces de actuar sin piedad contra sus objetivos. Ejemplos de todo ello se pueden encontrar en libros y películas como *Hulk*, *Inteligencia artificial*, *La era del diamante*, *manual ilustrado para jovencitas*, *Minority report*, *Prey*, *Spiderman*, *Spy*

kids, Stargate, Star Trek: The Next Generation, The Tuxedo, Terminator 3, Yo robot, etc.

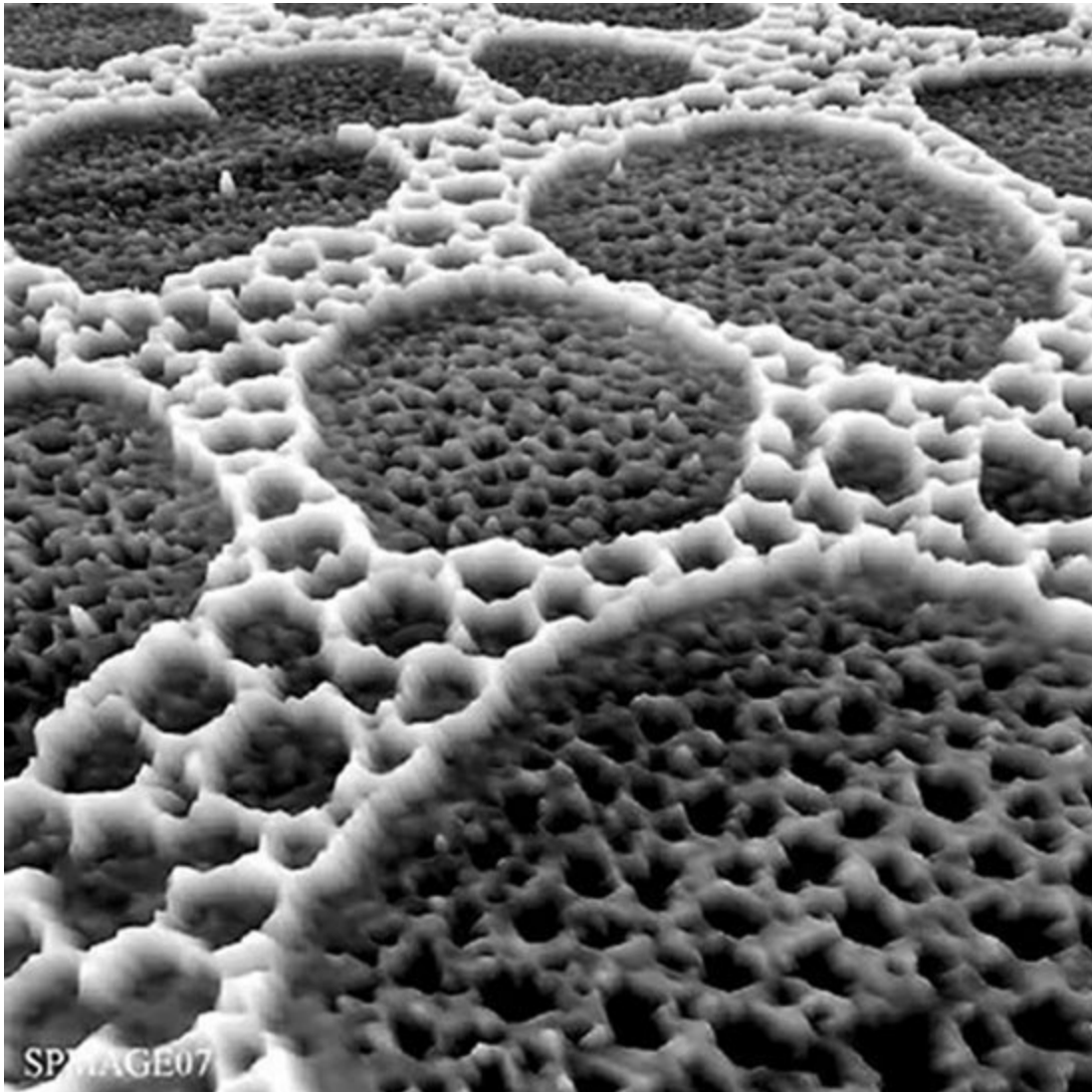


FIGURA 8.6. Imagen titulada «Nanopartículas de oro formando redes multiescala sobre silicio», obra del Dr. Mathew Blunt (Universidad de Nottingham, Reino Unido), finalista de la edición del año 2007 del concurso SPMAGE (<http://www.icmm.csic.es/spmage/>).

Sin duda alguna, las películas que se inspiran en los avances de la nanotecnología tienen dos antecedentes en el cine clásico. Así, en el final de *El increíble hombre menguante*, dirigida por Jack Arnold en 1957, el protagonista se adentra en el micro- y el nanomundo y continúa, muy a su pesar, un intrigante viaje hasta lo infinitamente pequeño. Dos años después, no sabemos si movido por esta sugerente imagen además de por su tremenda intuición, Richard P. Feynman acuñaría su famosa frase «*There's plenty of room at the bottom*». Y en 1966, mucho antes de que la nanotecnología se convirtiera en un campo de trabajo, R. Fleischer dirigió una cinta llamada a convertirse en obra de culto: *Viaje alucinante*. Esta película imaginaba submarinos que son

miniaturizados hasta el tamaño de auténticos nanorrobots (tripulados por nanohumanos, lógicamente) capaces de entrar en el cuerpo de un científico y destruir un coágulo formado en una arteria de su cerebro. La obra es, además de muy entretenida, un ejemplo de cómo a veces la imaginación y el arte se adelantan a lo que luego puede convertirse en un reto para la ciencia, algo que Julio Verne nos había enseñado ya en el siglo XIX. En cualquier caso, como se comenta en el Capítulo 7, afortunadamente los nanosubmarinos y nanorrobots que ahora se están proponiendo desde los laboratorios no van a requerir más «tripulación» que los fármacos que lleven en su interior. En la Figura 8.7 se muestran los carteles de estas dos películas clásicas y también de dos de las cintas actuales que más relación tienen con la nanotecnología.



FIGURA 8.7. Carteles originales de las películas *El increíble hombre menguante* (Jack Arnold, 1957), *Viaje alucinante* (Richard Fleischer, 1966), *Minority report* (Steven Spielberg, 2002) y *The Amazing Spider-Man* (Marc Webb, 2012).

Algunas series de televisión, como *Ben 10*, *Jake 2.0* o *Super Agente Cody Banks*, videojuegos como *Red Faction* o *Resident Evil 4*, o juegos online como el titulado *OGAME* alimentan la fascinación de los más jóvenes por la nanotecnología. Además, muchos dibujantes de cómics se basan en materiales o dispositivos provenientes del nanomundo, que al interaccionar con la siempre ocurrente imaginación del autor permiten proponer aventuras y personajes que por lo general tienen a los nanorrobots como protagonistas. En esos casos, el repertorio de nanomáquinas y nanodispositivos se desborda por completo. Sin embargo, una crítica general que se puede hacer desde la ciencia a estos nanorrobots ficticios es que los reales, cuando lleguen, serán necesariamente mucho más sencillos y elegantes: agregados de moléculas que en absoluto nos recordarán el aspecto de las máquinas y aparatos variopintos del mundo macroscópico que nos rodea. El trabajo de los investigadores, inspirado por la naturaleza y siempre situado en la interfase entre el rigor del método científico y el vuelo de la creatividad, producirá resultados que hoy no podemos ni siquiera soñar. La realidad, una vez más, superará a la ficción.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Al-Qadi, S., y C. Remuñán-López, «Nanopartículas metálicas: oro», *Monografía XXVIII de la Real Academia Nacional de Farmacia: Nanotecnología farmacéutica*, 2009. [<http://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/994/1028>]
- Briones, Carlos, «El origen y la evolución temprana de la vida», *Revista de Occidente*, n.º 361, (junio de 2011), n.º 19-38.
- , Elena Casero, José Ángel Martín-Gago y Pedro Serena, *Nano-ciencia y Nanotecnología. Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro. Unidad Didáctica Nanociencia y Nano-tecnología*, Fundación Española para la Ciencia y Tecnología, Madrid, 2009.
- , Susanna Manrubia y José Ángel Martín-Gago, «Redes en el nanomundo», en AA.VV., *Banquete: Nodos y Redes*, Sociedad Estatal para la Acción Cultural Exterior-Turner, Madrid, 2009, n.º 49-52. [<http://www.banquete.org/banquete08/Redes-en-el-nanomundo>]
- Bustamante, Carlos, y Ricardo García, «Aplicaciones biológicas del microscopio de fuerzas», *Investigación y ciencia*, n.º 246, (marzo de 1997).
- Corma, Avelino, y Hermenegildo García, «Catálisis», *Investigación y Ciencia*, n.º 319 (abril de 2003), p. 68.
- Darder, Margarita, Pilar Aranda y Eduardo Ruiz-Hitzky «Bio-nano-composites: nuevos materiales ecológicos, biocompatibles y funcionales», *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, n.º 103 (1) (2007), n.º 21-29.
- Drexler, Erik K., «Nanotécnica y ensambladores», *Investigación y Ciencia*, n.º 302 (noviembre de 2001), n.º 70-71.
- Elices Calafat, Manuel, «Nanomateriales», *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas y Físicas Naturales*, vol. 97, n.º 2 (2003), n.º 271-287.
- Fernández Otero, Toribio, «Polímeros conductores: síntesis, propiedades y aplicaciones electroquímicas», *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 4 (4), 2003, n.º 1-37.
- Geim, André K., y Philip Kim, «Grafeno», *Investigación y Ciencia*, n.º 381 (junio de 2008), p. 54.
- González, M. B., y A. Costa, «Los biosensores electroquímicos: herramientas de la analítica y del diagnóstico clínico», *Monografía XXX de la Real Academia Nacional de Farmacia: Biomarcadores: Analítica, Diagnóstico y Terapéutica*, 2010. [<http://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/1068/1065>]
- González Carmona, José, M^a Ángeles Hernández Vozmediano y Francisco Guinea, «Electrónica del grafeno», *Investigación y Ciencia*, (septiembre de 2010), n.º 42-49.

- Gonzalo, Teresa, y M^a Ángeles Muñoz, «Dendrímeros y sus aplicaciones biomédicas», *Monografía XXVIII de la Real Academia Nacional de Farmacia: Nanotecnología farmacéutica*, 2009. [<http://www.analesranf.com/index.php/mono/article/viewFile/992/1026>]
- Lechuga, Laura M., «La revolución de la nanomedicina», *Sociedad Española de Directivos de la Medicina (SEDISA)*, 2008, n.º 38-43. [http://digital.csic.es/bitstream/10261/27998/1/038_043_Articulo_05.pdf]
- López Nicolás, José Manuel, «Nanotecnología alimentaria: cuando lo pequeño es mucho más», *Revista Naukas*, vol. 3 (2013), n.º 86-87.
- Mallouk, T. E., y Ayusman Sen, «Propulsión y conducción de nanorrobots», *Investigación y Ciencia*, n.º 394 (julio de 2009), n.º 30-37.
- Marcos, Mercedes, y José Luis Serrano, «Polímeros Dendríticos», *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, vol. 105 (2), 2009, n.º 103-110.
- Martín, Nazario, «Sobre fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno», *Arbor. Ciencia, Pensamiento y Cultura*, n.º 187 (2011), n.º 115-131.
- Moya, Andrés, y Juli Peretó, «¿Hacia la fabricación de vida?», *Pasajes de Pensamiento Contemporáneo* (Edicions de la Universitat de València), vol. 38 (2012), n.º 4-5.
- Roukes, Michael, «Leyes nanoescalares», *Investigación y Ciencia*, n.º 302 (noviembre de 2001), n.º 46-53.
- Ruiz-Mirazo, Kepa, y Álvaro Moreno, «Biología sintética: enfrentándose a la vida para comprenderla, utilizarla o extenderla», *Pasajes de Pensamiento Contemporáneo* (Ed. Universitat de València), vol. 38 (2012), n.º 28-37.
- Serena Domingo, Pedro Amalio, *¿Qué sabemos de...? La nanotecnología*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Los libros de la Catarata, Madrid, 2010.
- Smalley, Richard E., «Nanotécnica y química», *Investigación y Ciencia*, n.º 302 (noviembre de 2001), n.º 72-73.
- Vázquez Tato, José, «Química supramolecular», *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 6 (1), 2005, n.º 44-80.
- Von Mikecz, Anna, «Nanopartículas. Minúsculas y penetrantes», *Investigación y Ciencia*, n.º monográfico 53 («Mente y Cerebro»), 2012, n.º 72-75.
- Withesides, G. M., «Máquinas nanométricas antiguas y futuras», *Investigación y Ciencia*, n.º 302, (noviembre de 2001), n.º 74-81.



ÁLBUM DE FOTOS

Las imágenes que se muestran a continuación no se obtienen mirando por una lente, como en los microscopios ópticos tradicionales, sino que la señal electrónica es interpretada por un ordenador y mostrada en forma de imagen. Éstas pueden representarse de diversas maneras. Algunas de ellas las veremos en 3D, y otras, la mayoría, en una vista desde arriba. En estos casos, normalmente, el color más vivo indica la parte más elevada. Varias de las fotografías que se muestran a continuación son cortesía de diferentes grupos de investigación y otras han resultado finalistas de algunas de las ediciones del concurso SPMAGE, organizado por la Universidad Autónoma de Madrid y el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, del CSIC (<http://www.icmm.csic.es/spmage>).

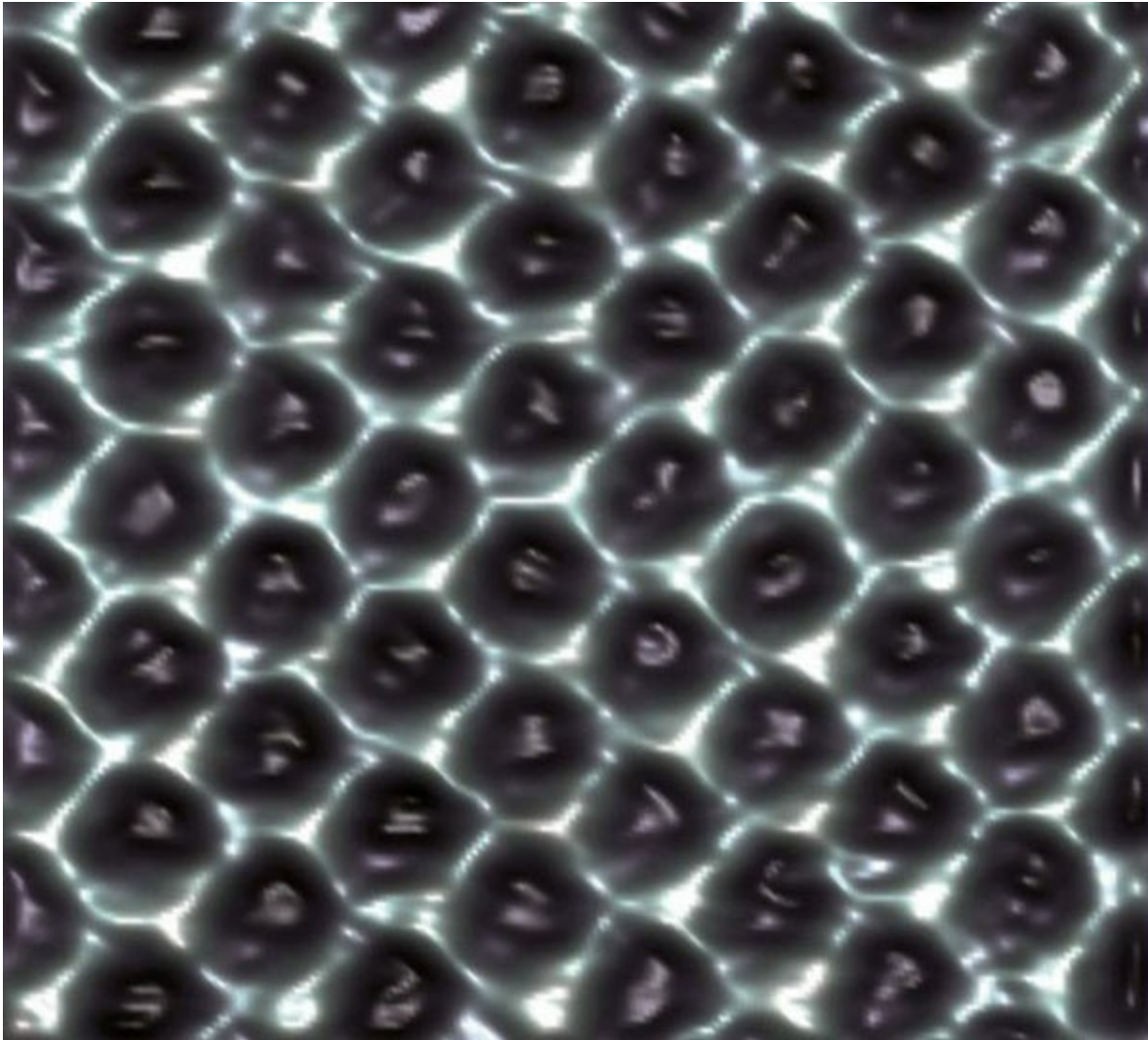
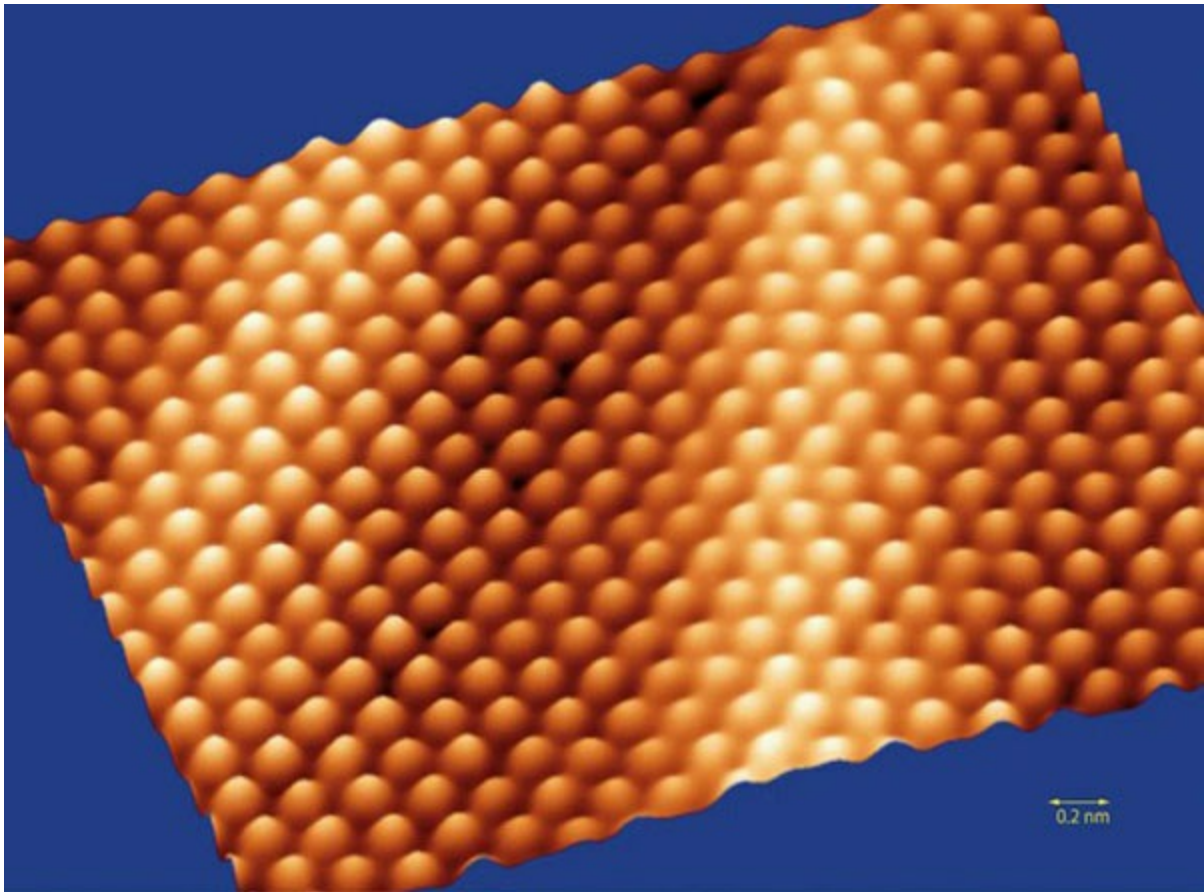


Imagen tomada con un microscopio de efecto túnel de una superficie de grafeno crecido sobre carburo de silicio. Se observa la distribución hexagonal de los átomos de carbono. Foto tomada por Pablo Merino, grupo ESISNA (ICMM-CSIC).



Uno de los objetos más grandes del universo: la nebulosa de Orión, observada con el telescopio espacial Herschel en longitudes de onda del infrarrojo. En esta imagen las distancias se miden en años luz. Copyright: ESA.



Paisaje atómico: átomos que forman una superficie de oro. La separación entre ellos se mide en nanómetros. Gentileza del grupo ESISNA (ICMM-CSIC).

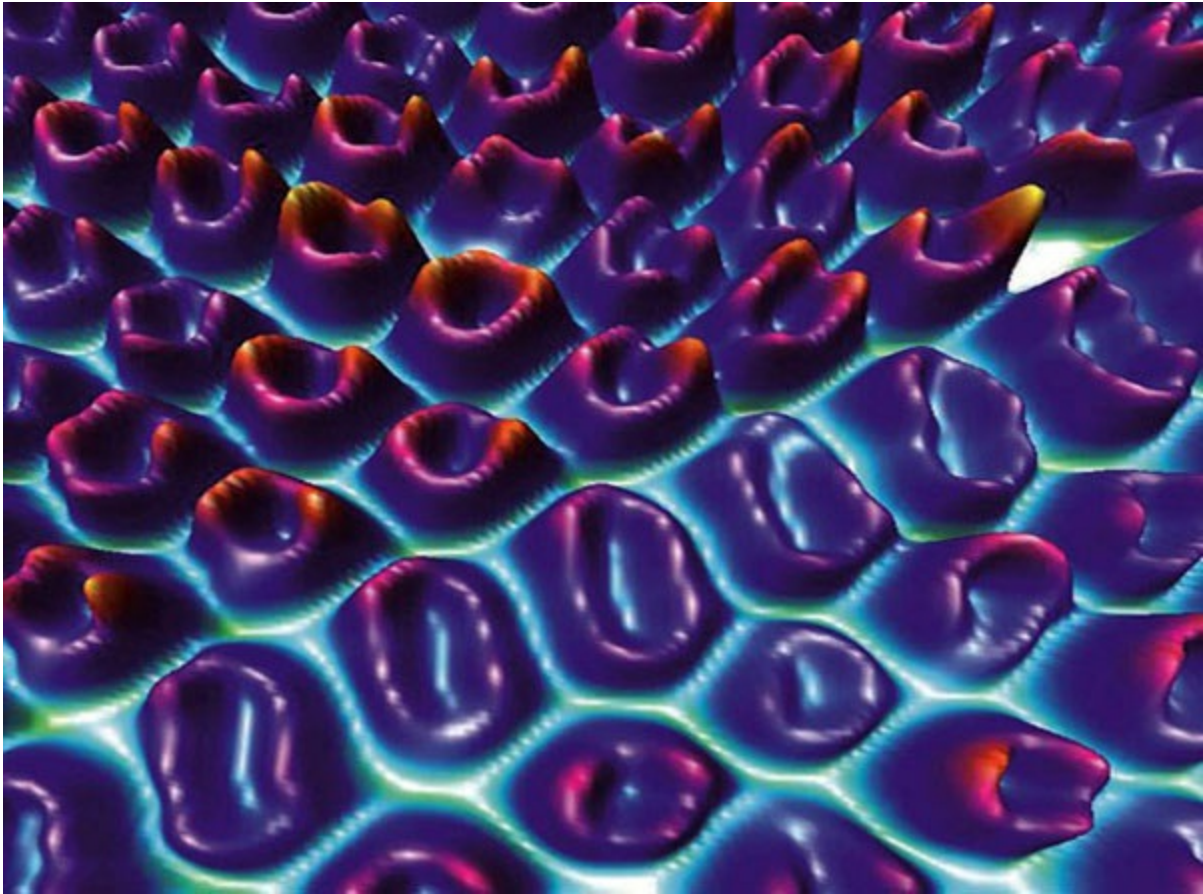
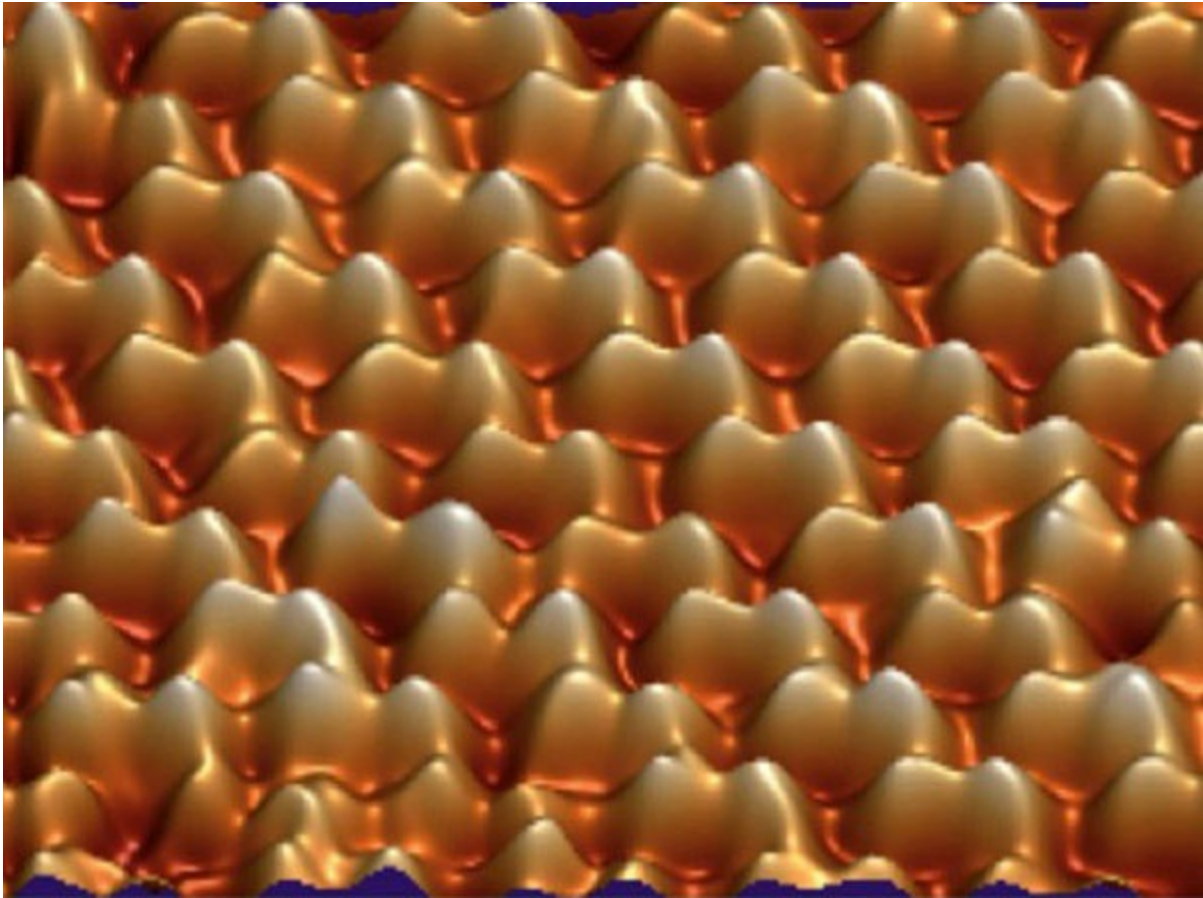


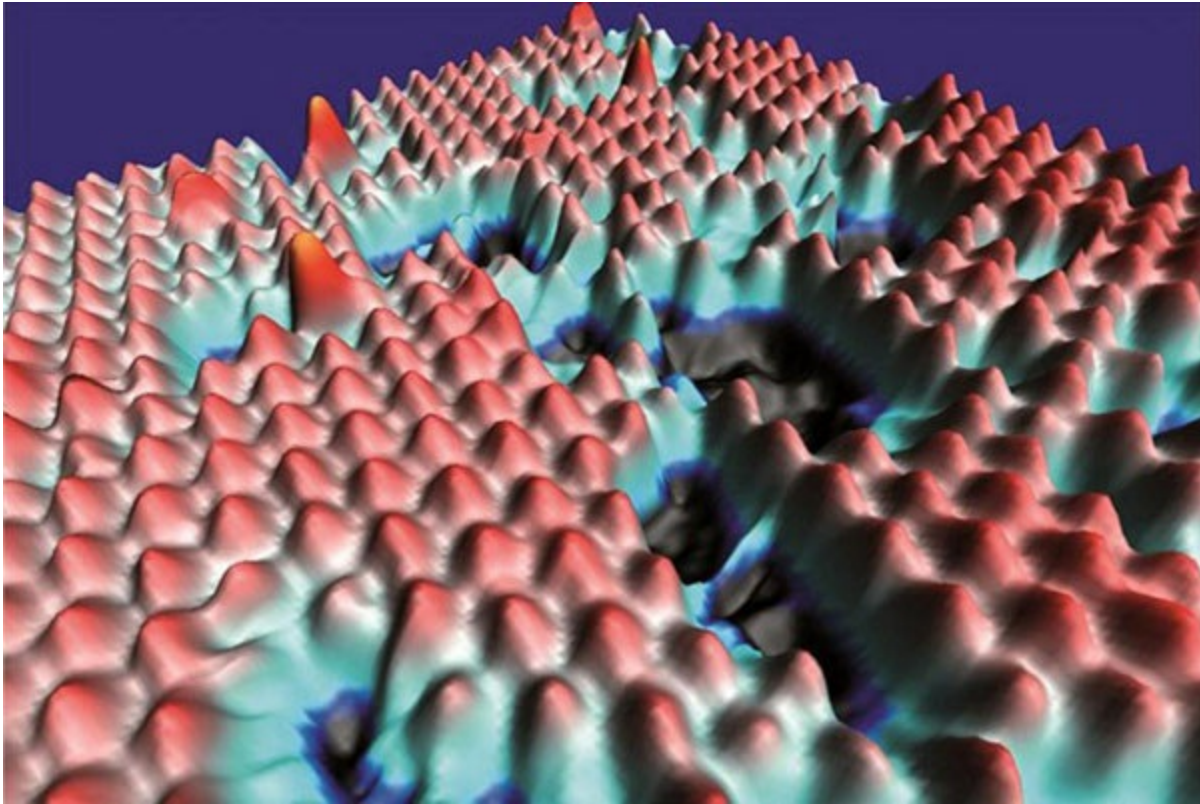
Imagen de moléculas de porfirina, constituyente principal de los glóbulos rojos, tomada con un microscopio de efecto túnel operando en ultra alto vacío. La nanotecnología, imitando a la naturaleza, trata de fabricar sistemas nanométricos para obtener energía. Gentileza de Celia Rogero, Centro de Astrobiología (CABINTA-CSIC).



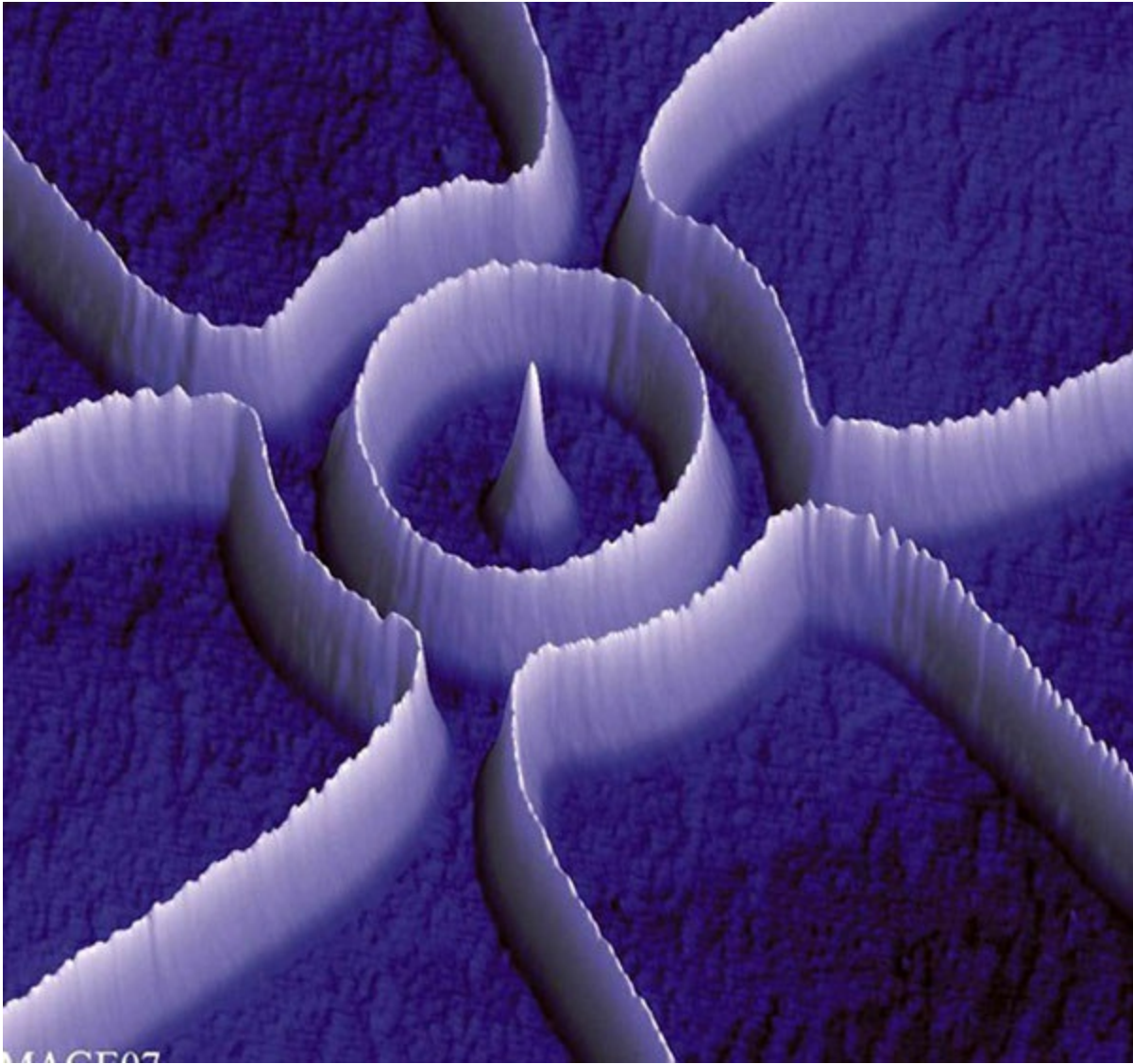
Cuando recubrimos una superficie con biomoléculas, éstas se organizan formando estructuras ordenadas de una alta perfección como resultado de las leyes químicas fundamentales. La imagen muestra moléculas de prolina depositadas sobre una superficie de cobre. Gentileza de Celia Rogero, Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA).



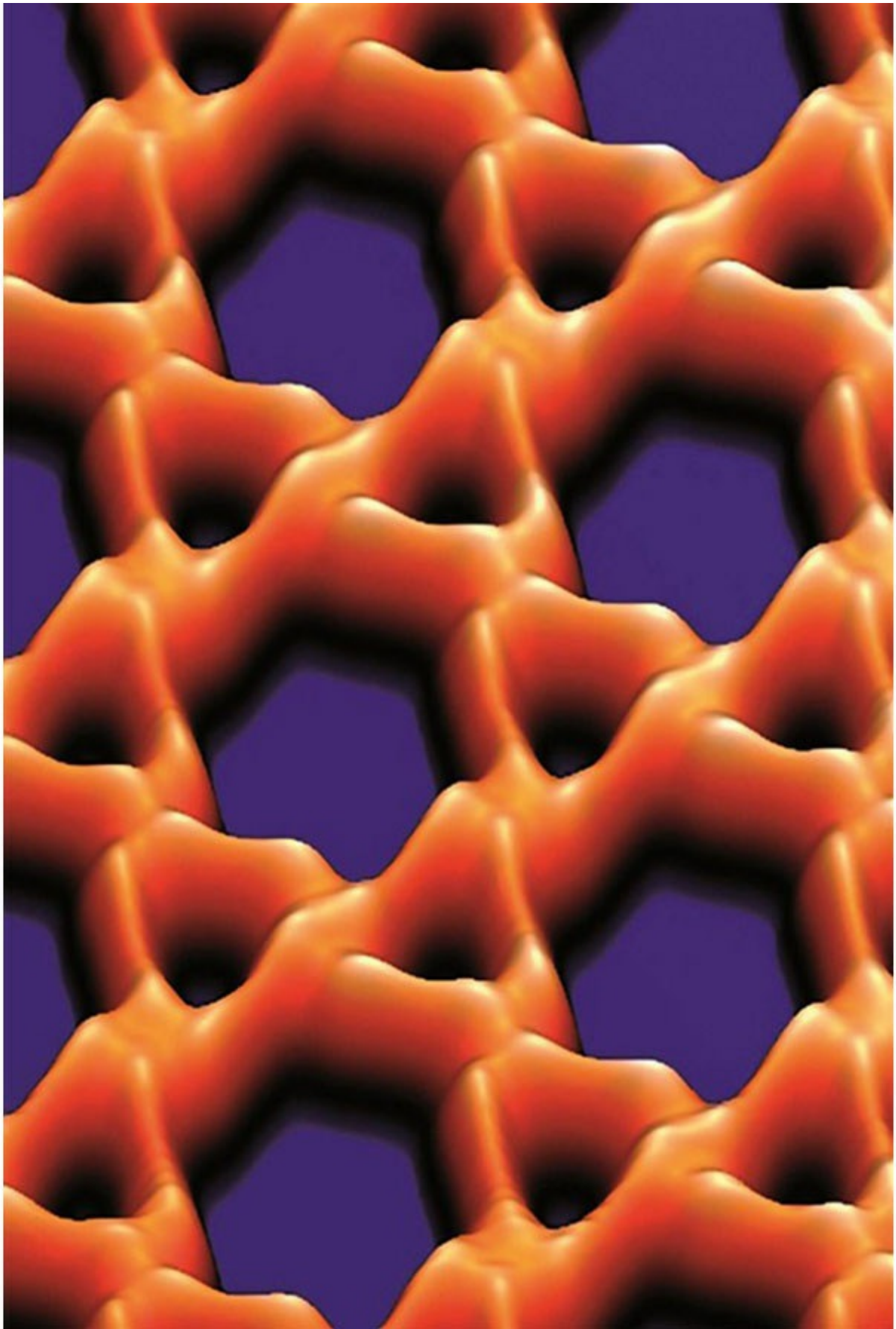
Esta imagen muestra un alfabeto completo, junto a varios símbolos y emoticonos, construido mediante la tecnología denominada origami de ADN. Cada uno de estos caracteres, con tamaño de fuente de 100 nm, está formado por cientos de moléculas de ADN de cadena sencilla y 42 nucleótidos de longitud, cuyas secuencias han sido diseñadas para que se autoensamblen y originen la forma deseada. El resultado final se ha visualizado por microscopía de fuerza atómica (AFM). Imagen obtenida por Bryan Wei, Mingjie Dai y Peng Yin (Instituto Wyss de Ingeniería Bioinspirada, Universidad de Harvard, USA). Figura adaptada con permiso de Macmillan Publishers Ltd: Nature 485 (2012).



Estas capas moleculares organizadas pueden ser los constituyentes principales de nuevos dispositivos electrónicos, más rápidos y flexibles que los actuales, basados en silicio. En la fotografía vemos una capa de PTCDA autoorganizada sobre la superficie de un metal. Gentileza de Javier Méndez, grupo ESISNA (ICMM-CSIC).



Aquí se muestra un transistor capaz de manipular un único electrón. Este dispositivo está formado por cuatro terminales y un anillo que se han «dibujado» sobre una superficie de arseniuro de galio y aluminio (AlGaAs) mediante oxidación local inducida por la punta de un microscopio de efecto túnel (STM). Estas líneas, de 15 nm de altura, forman barreras para los electrones que se mueven sobre la superficie, separando las regiones que constituyen el transistor. La imagen, titulada «Nanoanillo» y tomada por Andreas Fuhrer (Escuela Politécnica Federal de Zurich, Suiza) fue premiada en el concurso SPIMAGE07.



Esta imagen de STM muestra una red formada por moléculas de dicarbonitril-pentafenil sobre una superficie de plata (Ag(111)) a una temperatura de 10 K. La compleja estructura observada se forma mediante el autoensamblado de dichas moléculas, que se reconocen y enlazan buscando las posiciones que minimizan la energía total del sistema: las moléculas se ensamblan en unidades triangulares, que a su vez se ordenan formando poros hexagonales. La geometría resultante es similar a la de la red de tipo «kagome» que aparece en otros sistemas físicos. Esta imagen, titulada «Red Quiral “Kagome” formada mediante autoensamblado», de Uta Schlickum (Escuela Politécnica Federal de Lausana, Suiza), fue finalista de la edición SPMAGE09.

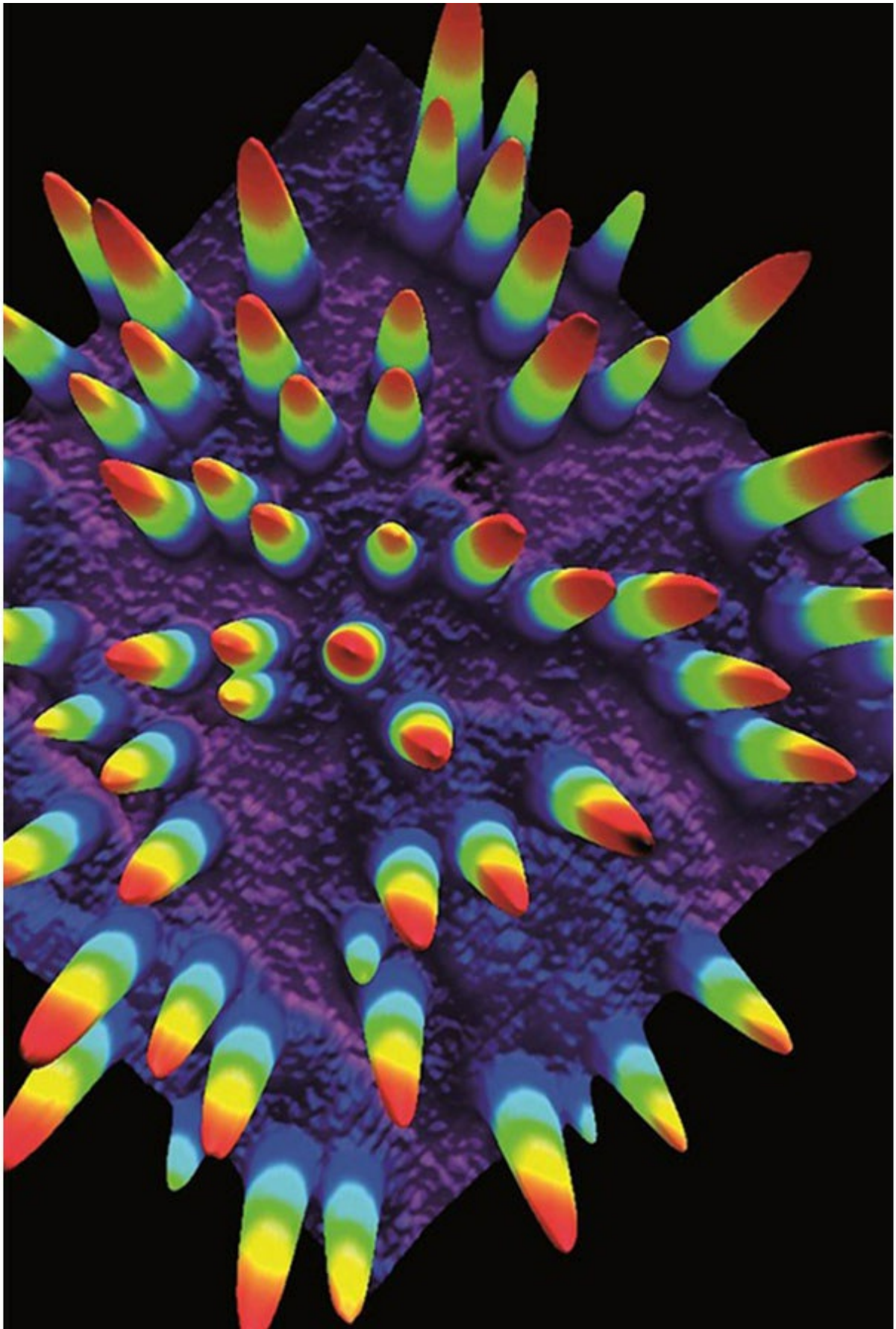


Imagen de islas de arseniuro de indio (InAs) crecidas sobre arseniuro de galio (GaAs). Dichas islas han sido obtenidas mediante la técnica de crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE, Molecular Beam Epitaxy). Estas estructuras se convierten en puntos cuánticos (QD, Quantum Dots) cuando se insertan en un material semiconductor convenientemente seleccionado. Esta imagen, titulada «Rascacielos del nanomundo: puntos cuánticos», tiene como autor a Jorge M. García del Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM, CNM-CSIC) y fue finalista de la edición SPMAGE09.



Imagen de una bacteria de la especie *Escherichia coli* obtenida mediante AFM en ausencia de humedad. Se pueden observar nítidamente estructuras flagelares y los pili («cabellos» en latín). El tamaño de la célula es de aproximadamente $1,9\ \mu\text{m}$ de largo por $1\ \mu\text{m}$ de ancho. Los pili y los flagelos tienen diámetros de $20\ \text{nm}$ y $30\ \text{nm}$, respectivamente. La imagen, titulada «*Escherichia coli* con “pili” y flagelos», tomada por Li Ang (Universidad Nacional de Singapur) fue finalista de la edición SPMAGE07.

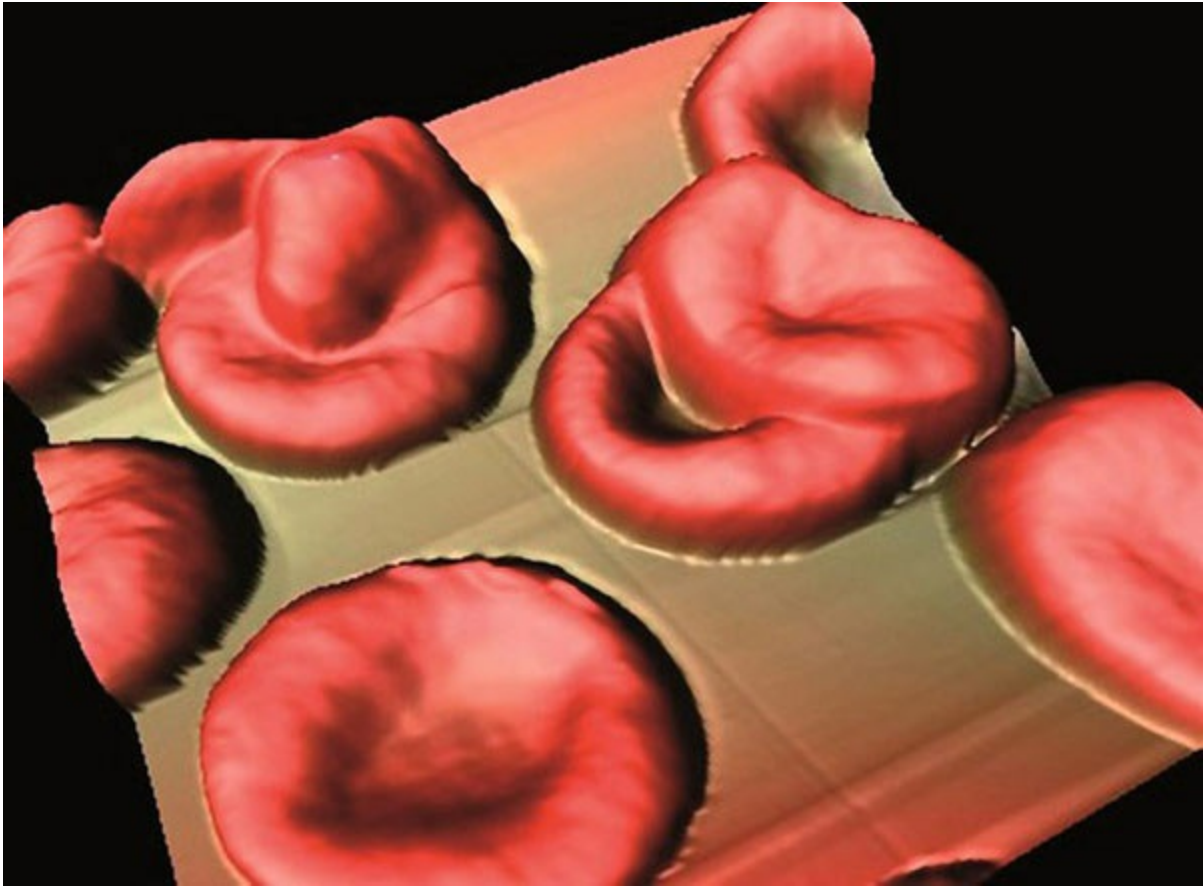


Imagen AFM de eritrocitos (glóbulos rojos) con diferentes formas. La muestra le fue extraída a un paciente de diabetes mellitus dos días después de haber sufrido un infarto de miocardio: en algunos casos los glóbulos rojos se agrupan formando agregados que modifican la corriente sanguínea y provocan complicaciones adicionales de la diabetes. Esta imagen, titulada «Agrupación sangrienta» y tomada por Elizaveta Drozd (Instituto A. I. Lykov de Transferencia de Calor y Masa, Minsk, Bielorrusia) fue finalista de la edición SPMAGE09.