

Jesús de la Peña Hernández
Doctor Ingeniero del ICAI, promoción de 1955. Vicepresidente del Comité de Inventiva y Creatividad y Vocal del de Terminología en el IIE. Fue profesor de Calidad y Fiabilidad en la ETS de II del ICAI.

Sobre la nanotecnología

Lo nano, tanto si se refiere a la tecnología, a la ciencia o a la estatura de las personas, hace referencia a lo pequeño, según su etimología griega (“nanos”, pequeño). Uno de los caminos por los que se adentró siempre la curiosidad humana fue el de la miniaturización. Por él se llegó antes a lo micro, y recientemente a lo nano.

En el campo micro veíamos con el microscopio, y medíamos con la unidad micrómetro (familiarmente micra $-\mu\text{m}-$ o milésima de mm) equivalente a 10^{-6} m.

En el campo micro la unidad micrómetro ya se nos ha quedado demasiado grande para medir lo que hay dentro de tanto espacio vacío como hemos descubierto en nuestras investigaciones desde arriba hasta abajo. Es como si quisiéramos medir la distancia de Madrid a Córdoba en años-luz.

Ése era el significado del título de la conferencia que pronunció en 1995 el físico estadounidense Richard Feinman, que había sido Premio Nobel de Física en 1965: “There’s plenty of room at the bottom”. El asunto versaba sobre “Top-down nanotechnology”. Para interpretar bien estas palabras hay que tener en cuenta los dos modos básicos de investigación que son normales en ciencias y en humanidades, pero muy particularmente en la investigación del software. Son estos el modo “top-down” y el “bottom-up”.

En realidad se trata de los dos modos cartesianos de investigación: análisis y síntesis. El “top-down” o análisis es bueno para el descubrimiento; el “bottom-up” o síntesis es el adecuado para demostrar lo conocido (o considerado como tal). La conclusión es que, analizando, llegamos al final a que hay mucho espacio vacío entre partículas, átomos, moléculas, etc.

Así pues, tal vez sigamos en nuestras fábricas jugando con micras para conseguir los adecuados ajustes entre piezas. Incluso la biología las necesita para manejar células: cada una mide de 10 a 20 micras. Pero los virus son mucho más pequeños que las células: miden entre 2 micras y 2 centésimas de micra.

También la microelectrónica, con esa reducción del tamaño de los circuitos integrados de los ordenadores, está quedando superada (cada 18 meses se viene reduciendo a la mitad ese tamaño).

Por tanto, ha habido que inventar la nanoescala, la que utiliza el nanómetro como

Comentarios a:
comentarios@icai.es

unidad. Un nanómetro equivale a una milésima de micra, es decir es igual a 10^{-9} m. El rango de uso de la nanoescala va de un nanómetro (1 nm) a 100 nm.

Ya hemos dicho que un pequeño virus puede medir 2 centésimas de micra, es decir, 20 nm. Por otro lado, si alineamos 4 ó 5 átomos pegados unos a otros nos dan una longitud de 1 nm. De hecho, una cadena de 6 átomos de carbono así dispuesta mide 1,15 nm.

Para mejor imaginar todo esto vamos a hacer un pequeño ejercicio que está a nuestro alcance (es un decir). Partamos de un cubo de lado $a=1$ cm que trocaremos mediante tres cortes según tres planos perpendiculares entre sí, y que pasen por el centro del cubo. En la primera operación hemos obtenido 8 cubos iguales de medio cm de lado cada uno (ver Figura 1).

Repitamos la operación con cada cubo pequeño que obtenemos, llevando cuenta de la longitud del lado de los cubos sucesivos, y del área total que se obtiene después de cada operación (ver Tabla 1).

Veamos ahora cuántas operaciones habrá que hacer para conseguir que el lado del pequeño cubo resultante al final, mida 1 nm ($1 \text{ cm} = 10^7 \text{ nm}$). Será:

$$\begin{aligned} 10^7 * 2^{-n+1} &= 1 \\ 7 + \log_2 * (-n+1) &= 0 \\ n &= 1 + 7/\log_2 = 24 \end{aligned}$$

Es decir, con 24 operaciones sucesivas de partición hemos obtenido $2^{3(n-1)} = 2^{69} = 10^{21}$ cubitos de 1 nm de lado que representan un área total de $3 * 2^n = 3 * 2^{24} = 50,3$ millones de cm^2 (recordar que partimos de tan solo 6 cm^2). Esta nueva superficie es equivalente a la de un cuadrado que tuviera 71 m de lado.

Y, ¿qué utilidad puede tener esto de que la nanotecnología sea capaz de ofrecernos superficies tan ampliadas? Dos ejemplos:

- Los microchips de las memorias pueden llegar a tener muchísima más capacidad de almacenamiento en su superficie, precisamente por ser mayor ésta.
- El almacenamiento del hidrógeno es problemático y habrá que resolverlo bien para cuando se generalice su uso. Hoy se almacena comprimido, líquido, o adsorbido en hidruros metálicos. La adsorción (adhesión del hidrógeno a determinadas superficies) es lo que da la pista de cómo aprovechar la ampliación superficial que brinda la nano-

Figura 1

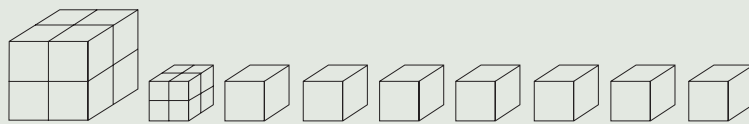
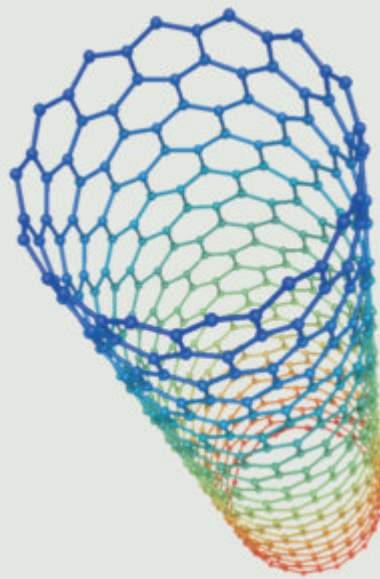


Tabla 1

Operación	Cantidad de cubos	Lado del cubo (centímetros)	Área de un cubo (cm^2)	Área total (cm^2)
1	$1 = 2^0$	$a = a * 2^0$	$6(a * 2^0)^2 = 3a^{2*2^1}$	$3a^{2*2^1*2^0} = 3a^{2*2^1}$
2	$8 = 2^3$	$a/2 = a * 2^{-1}$	$6(a * 2^{-1})^2 = 3a^{2*2^{-1}}$	$3a^{2*2^{-1}*2^3} = 3a^{2*2^2}$
3	$8^2 = 2^6$	$a/4 = a * 2^{-2}$	$6(a * 2^{-2})^2 = 3a^{2*2^{-2}}$	$3a^{2*2^{-2}*2^6} = 3a^{2*2^3}$
4	$8^3 = 2^9$	$a/8 = a * 2^{-3}$	$6(a * 2^{-3})^2 = 3a^{2*2^{-3}}$	$3a^{2*2^{-3}*2^9} = 3a^{2*2^4}$
n	$2^3(n-1)$	$a * 2^{-n+1}$	$3a^{2*2^{-n+3}}$	$3a^{2*2^n}$

Figura 2



tecnología, para almacenar hidrógeno. Así, las dos formas alotrópicas del C que pueden ofrecer más superficie son los nanotubos (especie de superficies planas enrolladas sobre sí mismas, o superficies cilíndricas encapsuladas unas dentro de otras, pero siempre con estructuras atómicas hexagonales) (ver Figura 2), y los fullerenos (disposiciones atómicas esféricas conseguidas con estructuras hexagonales combinadas con pentagonales –esta combinación es la que produce el curvado de la superficie–). Se investiga no solo con el carbono, sino tam-

Figura 3

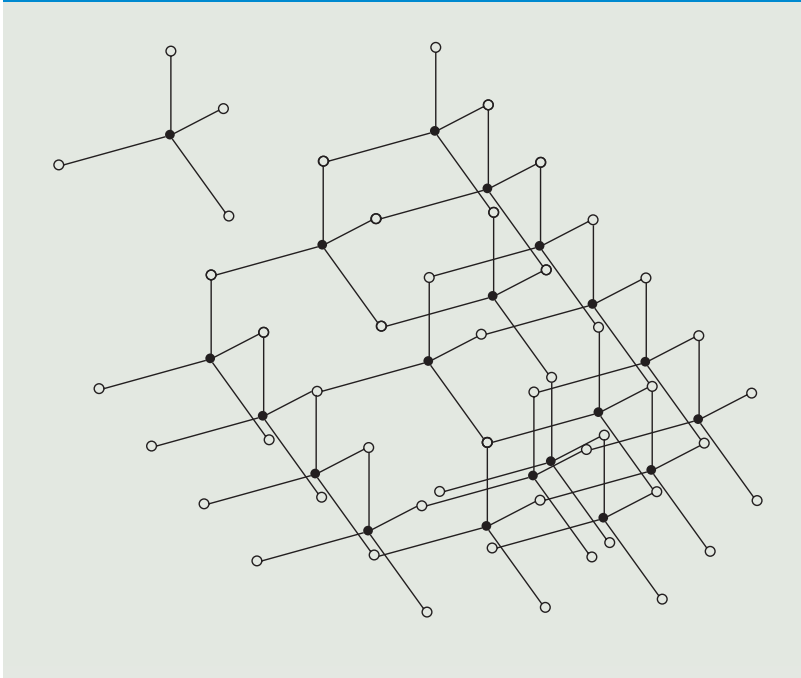
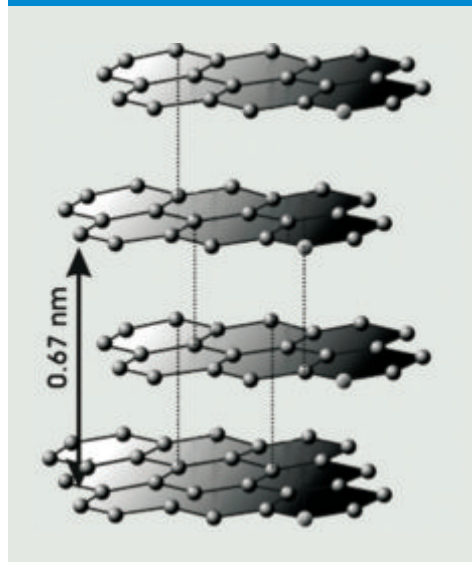


Figura 4

Figura 5



bién con el boro y con moléculas órgano-porosas, pero siempre en la misma línea de superficies extensas (la porosidad no es más que otra manifestación del mismo fenómeno superficial).

Será oportuno decir algo sobre esas estructuras del carbono. Éste, en su forma diamante, la más dura que se conoce, lo es gracias a la manera en que sus átomos están unidos entre sí.

La Figura 3 muestra arriba, a la izquierda el conjunto de sus 4 átomos unidos según un tetrapodo: el negro es el centro de un tetraedro y los 4 blancos son los vértices de éste. Cada pareja de patas forma un ángulo

$$\alpha = 2 \arctan \sqrt{2} = 109,47^\circ$$

El resto de dicha Figura 3 muestra cómo se entrelazan esos conjuntos atómicos para formar la red cristalina del diamante. Esos tetrapodos son parecidos a los empleados para construir las escolleras de los puertos (ver Figura 4), aunque el ángulo α de éstos es distinto del visto para el diamante.

Es curioso observar las tan distintas y útiles aplicaciones de los tetrápodos. Los de las escolleras se traban entre sí tan íntimamente que forman un conjunto indestructible a la fuerza de las olas; por otra parte, el espacio laberíntico que dejan entre sus patas es el necesario para absorber la energía del agua que rompe. En el caso del diamante, la fuerte unión entre átomos se produce, espacialmente, por la conexión entre los extremos de las patas de los tetrápodos. Es esa estructura la que confiere al diamante su gran dureza y estabilidad.

Frente a esa forma diamante está la del grafito (ver Figura 5), que también presenta sus cuatro uniones entre átomos, pero en este caso tres de ellas son uniones fuertes planas (lo que les confiere una estructura hexagonal plana), y la tercera es en forma de unión débil con un átomo de otra capa paralela. Ello conduce a una estructura laminar para el grafito con propiedades de fácil deslizamiento y conductividad eléctrica (ambas de aplicación, por ejemplo, en las escobillas de las máquinas rotativas).

He puesto dos ejemplos nano (microchips y adsorción de hidrógeno) que son sólo unos casos en los que se manifiestan aplicaciones prácticas, pero hay muchísimos más. La nanociencia está dando sus frutos

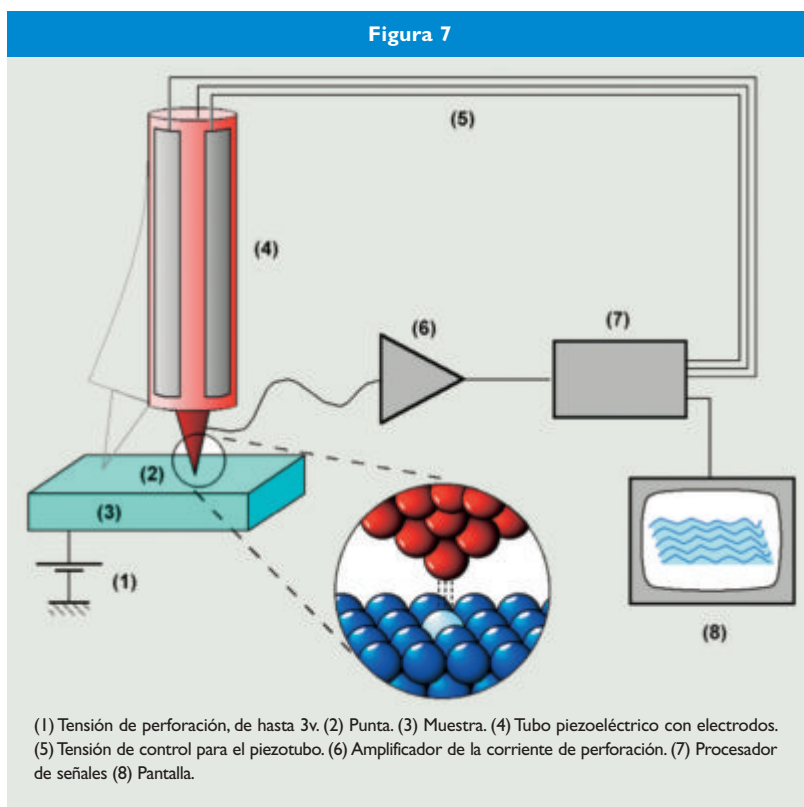
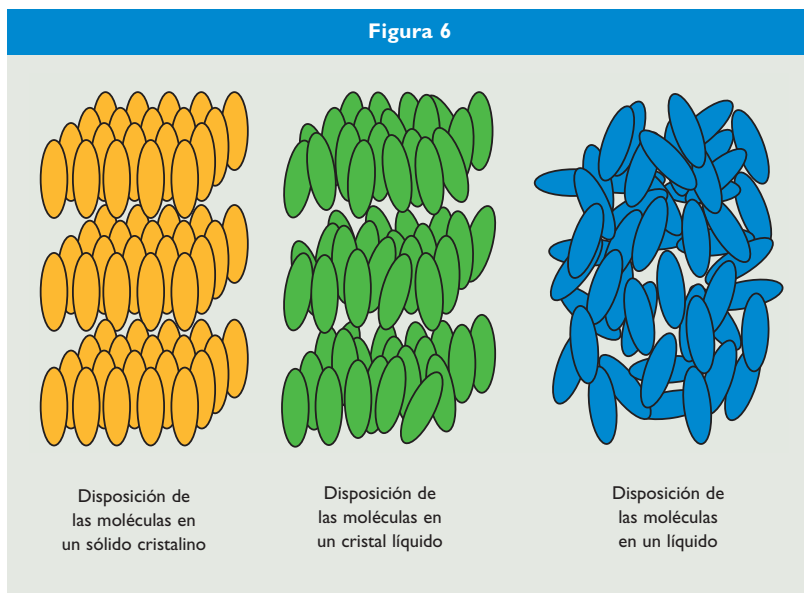
en cuestiones que ya nos van resultando familiares, como es el caso de los cristales líquidos tan empleados en las pantallas de los teléfonos móviles, calculadoras, ordenadores, etc. No son estos otra cosa que una fase intermedia entre la fase sólida de ciertos cuerpos cristalinos y la fase líquida a la que se llega por aumento de su temperatura.

Muchos de estos efectos se conocían incluso por haberlos visto macroscópicamente, pero no teníamos información miniaturizada de ellos. Por ejemplo, se sabía que el cristal líquido era una solución turbia previa a la de líquido transparente (F. Reinitzer, 1888). Hoy ya se sabe de esas estructuras moleculares (ver Figura 6) gracias al microscopio de luz polarizada.

El verdadero fondo de la cuestión estriba en disponer de herramientas capaces de facilitar las maniobras necesarias en dimensiones nano. Y ello no se puede lograr con los planteamientos de la mecánica clásica. La nanotecnología necesita acudir a la mecánica cuántica no relativista porque su ámbito es aquél en que experimentalmente se empieza a notar la imposibilidad de conocer con exactitud, simultáneamente, la posición y el momento de las partículas.

En los años siguientes a 1980, los investigadores de IBM en Zurich, Rohrer y Binnig, construyeron un equipo que se denominó de "efecto túnel" (ver Figura 7) y que permitía "ver" los átomos de las superficies. Por ese hallazgo recibieron el Premio Nobel de Física en 1986. El nombre completo era "Scanning Tunneling Microscope" (STM) que es por el que se conoce internacionalmente. En español tenemos cierta dificultad para acomodarnos al *tunnel* o *tunneling* inglés ya que en nuestro idioma, túnel, es sólo sustantivo, mientras que en inglés es además verbo; y como verbo se aplica en la instrumentación nanotecnológica. Por eso yo prefiero hablar de perforación o perforar. Cuando nosotros oímos la palabra túnel, pensamos en el agujero, no en el proceso por el que se obtuvo.

La Figura 7 muestra la constitución del equipo, que ha de mantenerse en el vacío. Conviene añadir algo elemental sobre su funcionamiento. Aplicada (1) a (3), que puede ser un conductor o un semiconductor, si se acerca (2) a (3) suficientemente (sin llegar al contacto), se establece entre ellas una corriente eléctrica que perfora la barrera de vacío que las separa. El valor de esa corriente



de perforación depende en gran medida de la distancia entre (2) y (3), y permite hacer un mapa del relieve atómico de la superficie de (2) si (4) se desplaza a lo largo y ancho de ella. A la izquierda de (4) se ve su propio perfil deformado como indicando ese movimiento de barrido.

Precisamente esa deformación de (4) en su desplazamiento es la que justifica el papel de sus elementos piezoeléctricos. Hasta aquí

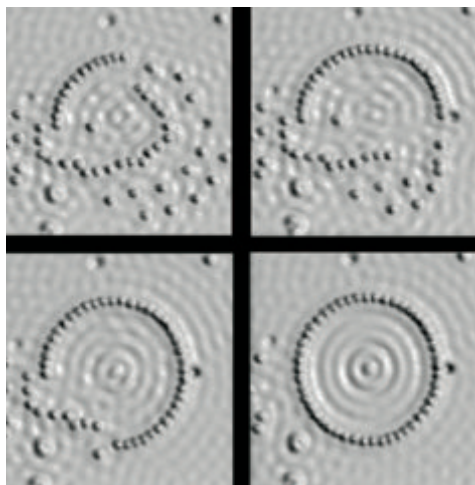
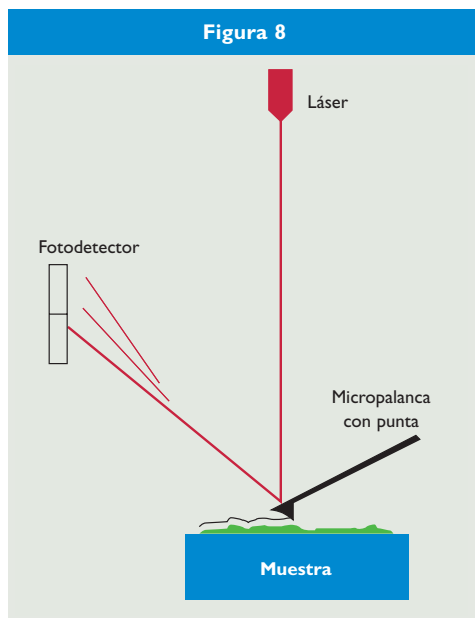


Figura 9

todo parece "de mecánica clásica", como la que rige nuestros familiares rugosímetros: sin contacto, piezoeléctricos, con precisiones de $0,1 \mu$ y resoluciones de $0,01 \mu$, etc.

Pero no es ése el caso. Los STM se rigen por los principios de la mecánica cuántica. Para empezar, la punta de (2) es del tamaño de un átomo. La distancia de perforación es inferior a 1 nm (igual a 10 armstrongs). La corriente de perforación es extremadamente débil puede variar desde el pico-amperio (10^{-12} amperios) al nano-amperio (10^{-9} amperios) y es el resultado de la superposición de las funciones de onda de los átomos de (2) y (3); es asimismo muy dependiente de la densidad de estados de los electrones (DOS) –Density Of Electronic States–, es decir, de la cantidad de electrones que hay con una energía específica) y de la altura de

la barrera local. Y varía muy rápidamente con la separación entre (2) y (3). Es precisamente esa variación de la corriente de perforación la que nos permite determinar la topografía de la superficie de (3) con tanta precisión como para poder "ver" sus átomos.

Según la mecánica clásica, un electrón no puede atravesar una barrera de energía superior a la suya, pero como en mecánica cuántica los electrones no están definidos por una posición exacta, sino por una nube de probabilidad, en ciertas condiciones, esta nube sí puede superar la barrera (referirse al nivel de energía de Fermi).

Como es fácil deducir, el STM vale sólo para estudiar conductores o semiconductores, ya que lo que maneja es una corriente eléctrica; pero ha servido como ejemplo para otras soluciones conocidas como SPM (Scanning Probe Microscopy). En este grupo se hallan los microscopios muy utilizados en todos los laboratorios y designados como AFM (Atomic Force Microscope) (Ver Fig. 8) que aprovechan las fuerzas de atracción de Van der Waals (fuerzas atómicas débiles si se comparan con las que se dan en las combinaciones químicas).

La micro palanca flexa cuando en su barrido la punta se ha acercado lo suficiente a la superficie de la muestra como para que aparezca la referida fuerza de atracción. La flecha de esa flexión es medida por un sistema láser que luego permite conocer el valor de la fuerza actuante aplicando la Ley de Hooke [ver, como analogía, mi www.caprichos-ingenieros.com; QUÉ; Mathematics and Origami (.pdf, en inglés); Hooke's Law].

Como en la Figura 7, el extremo de la punta también es de un átomo, pero los AFM tienen la particularidad de poderse usar en medios diversos (de humedad, temperatura, al aire o en un medio líquido, etc). Ello les hace aplicables en investigación biológica.

Si la punta es magnética, detecta señales magnéticas como las que se dan en los sistemas magnéticos de memoria en los que los bits (0/1) se corresponden con orientaciones opuestas del momento magnético. Entonces el SPM toma el nombre de MFM "Magnetic Force Microscope".

Después de ponderar cómo es tanta la finura, precisión y sofisticación de los SPM sólo queda añadir, como anécdota, que las micro palancas con su punta de un átomo, se venden por Internet.

Un potente software es capaz de convertir en imágenes los datos obtenidos en los rastreos superficiales; esas imágenes, no obstante, no son las de los átomos propiamente dichos, sino las de los electrones, o más bien, las de nubes de electrones que se hallan en permanente movimiento envolviendo los átomos. Así se llega a una situación en la que la ciencia y el arte se dan la mano al descubrir (o forzar) unas imágenes que son de gran mérito científico y de un valor artístico extraordinario. Ya existen concursos de imágenes en los que compiten científicos con gustos artísticos y artistas admiradores de la ciencia.

Hasta aquí hemos tratado los SPM como meros microscopios, instrumentos para ver lo nano. El siguiente paso que ya se ha dado es el de convertirlos en verdaderos manipuladores de átomos. Veamos cómo se desarrolla la maniobra de la Figura 9 cuyo resultado final es un corral cuántico formado por 48 átomos de Fe situados en círculo sobre una superficie de Cu(111).

La valla del corral contiene en su interior algunos electrones de estado de superficie que resultan forzados a estados cuánticos de estructura circular. Las ondulaciones circulares interiores representan la distribución de densidad de un conjunto de esos estados cuánticos.

El proceso seguido para llegar a esto ha sido el siguiente (ver en la Figura 9 el proceso en cuatro etapas):

- Temperatura ambiente muy baja (4 K).
- Conseguir que queden depositados sobre la superficie de Cu(111) los 48 átomos de Fe (por un procedimiento análogo al que se describe a continuación).
- La punta rastreadora se coloca justo sobre uno de los átomos depositados acercándola tanto cuanto se necesite para que la corriente de perforación cree la fuerza de atracción suficiente para dejar adsorbido el átomo de Fe en el átomo de la punta.
- Se lleva la punta rastreadora al punto donde se quiere depositar el átomo de Fe y, para desorberlo, se disminuye la corriente de perforación.

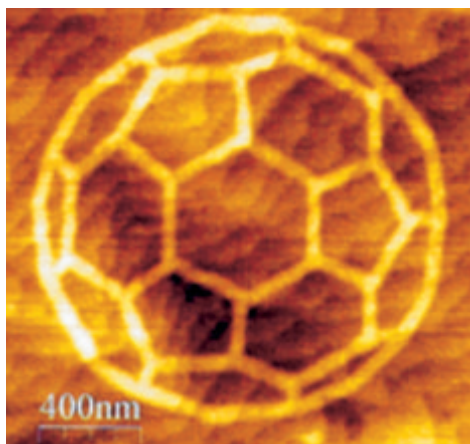


Figura 10

Esta última fase del proceso recuerda mucho a la maniobra habitual que todos practicamos para arrastrar y soltar un fichero en una determinada carpeta del buscador de nuestro portátil.

Hablábamos al principio de los fullerenos. La Figura 10 nos muestra uno situado en la frontera de lo científico y lo artístico. Porque no es en realidad una imagen 3D como salta a la vista, sino algo construido en 2D con un manipulador y luego retratado con un microscopio. De todas maneras esta imagen nos sirve para justificar el énfasis puesto al principio sobre los derivados del carbono. Se puede adivinar que podremos convertir el grafito en diamante, artificialmente. Para ello y para otras muchísimas aplicaciones prácticas habrá que desarrollar y perfeccionar los SPM en su versión de manipuladores, pero ahí está el inminente futuro. ■

Bibliografía

- C.S.I.C. (VII Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid).
 Wikipedia.
 Actas del Comité de Terminología del I.I.E.
 Mariano Gómez-Olea: "Teoría cuántica de los campos unificados".
 José Ignacio Linares Hurtado y Beatriz Y. Moratilla Soria: "El hidrógeno y la energía".
 Belén Garrido Garrido (*).

(*) <http://www.divulgamat.net/weborniak/Cultura/papiroflexia/cupulasgeodesicas.asp>

Las cúpulas geodésicas son cubiertas cóncavas de edificios, que por lo general tienen forma semiesférica. Están formadas por la unión de pequeños elementos triangulares que se ensamblan con facilidad y que al estar hechos de materiales ligeros permiten el techo de grandes espacios sin soportes. Los triángulos forman elementos hexagonales y pentagonales, estos últimos son la clave para curvar la superficie. Fueron patentadas en 1947 por el arquitecto americano Richard Buckminster Fuller (1895-1983). Su obra más famosa fue la esfera del pabellón USA en la Exposición Universal de Montreal de 1967. Este pabellón esférico futurista de 76 m de diámetro y 41,5 m de altura alcanzó fama mundial. Fuller fue una figura polémica que defendía la posibilidad de construir grandes espacios (barrios, ciudades) abovedados con este tipo de cúpulas. En su honor se ha llamado fullerenos a la tercera forma alotrópica del carbono (las otras dos son el diamante y el grafito) descubierta en 1985. Las moléculas del fullereno tienen 60 átomos de Carbono colocados en el espacio con la misma simetría que un balón de fútbol (icosaedro truncado).