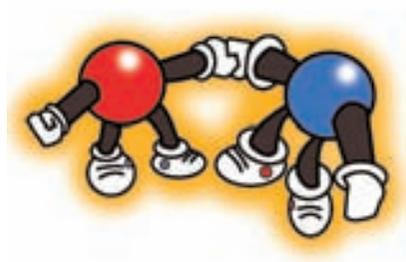


NANOESTRUCTURAS CON CURVATURA: un mundo de nuevas posibilidades



Matemáticas y química se conjuntan en el desarrollo de nuevas estructuras, con propiedades que serán de gran utilidad en la próxima era de la nanotecnología, en la que investigadores mexicanos han aportado resultados muy interesantes.

Humberto Terrones

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición, el ser humano ha utilizado los materiales a su alcance para crear utensilios que faciliten su vida diaria. Los primeros instrumentos estuvieron hechos de piedra, madera, huesos de animales y otros materiales disponibles. Posteriormente se dio un gran avance cuando se comenzaron a extraer metales y fundirlos, creando así armas para defensa y caza, utensilios de cocina, etcétera. Sin embargo, la revolución de nuevos materiales se dio en el siglo XX, y estos avances han marcado la pauta para los futuros materiales avanzados del siglo XXI.

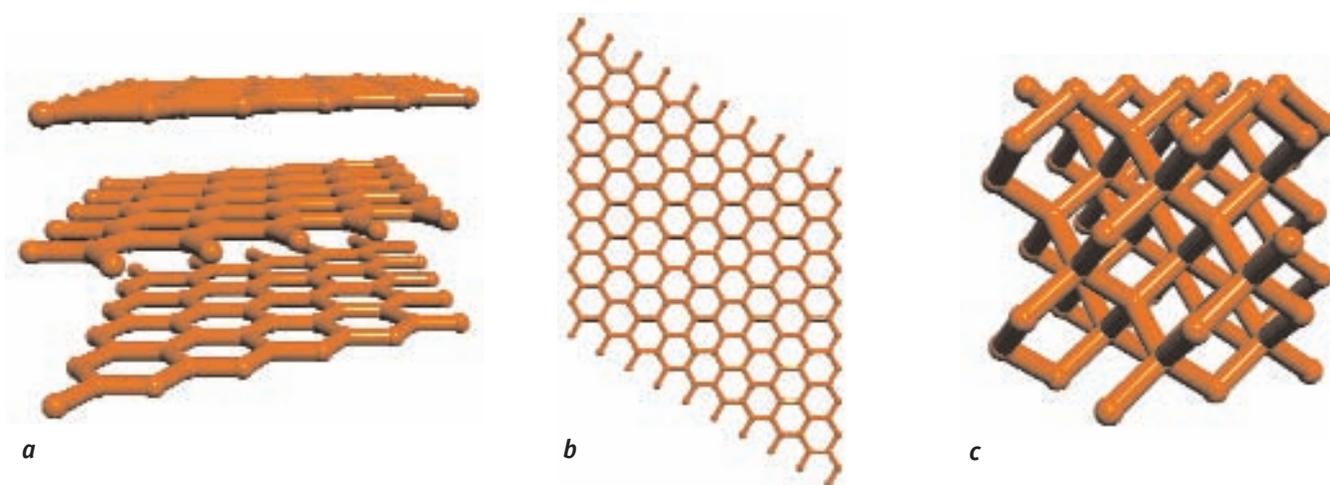
Todo lo que nos rodea está compuesto por átomos. Dependiendo de las posiciones que tomen en el espacio, tendremos materiales con

diferentes propiedades. Tal es el caso del grafito y el diamante: ambos están compuestos por átomos de carbono, pero con diferente estructura. En el grafito, como el que tenemos en las puntas de los lápices, cada átomo de carbono está conectado con otros tres formando capas hexagonales (véanse figuras 1a y b) separadas entre sí por 0.335 nanómetros (un nanómetro es una millonésima parte de un milímetro). En el diamante (véase figura 1c), los átomos de carbono están rodeados por otros cuatro, los cuales forman un tetraedro (poliedro de cuatro caras en el que cada cara es un triángulo equilátero). El grafito y el diamante tienen propiedades diferentes: el grafito conduce la electricidad y es opaco; el diamante es transparente y no es conductor. El diamante es el material más duro que existe sobre la Tierra y por esto lo usamos para cortar. Además, el diamante es más costoso. Si logramos controlar las posiciones de los átomos a voluntad, entonces podremos generar nuevos materiales con propiedades que nunca nos hemos imaginado.

El campo de investigación que se ocupa de estudiar, fabricar, diseñar y controlar materiales a nivel atómico es la nanotecnología. Uno de sus objetivos principales es construir nuevas

estructuras átomo por átomo. Sin embargo, la tecnología actual todavía no cuenta con el control necesario para hacerlo con todos los elementos de la tabla periódica. Aunque las complicaciones son muchas, ya tenemos indicios y experimentos que nos permiten diseñar algunos materiales nanoestructurados. El poder de la nanotecnología ha despertado a nivel mundial una gran cantidad de investigaciones encaminadas al control atómico de los materiales. Investigadores mexicanos han trabajado exhaustivamente en este tema, aportando resultados muy interesantes y originales. En este artículo explicaremos el papel de los materiales llamados laminares en la generación de nanoestructuras con curvatura y las posibles aplicaciones de éstas.

Hasta 1985 se creía que sólo existían dos formas del carbono: el grafito y el diamante



Hasta 1985 se creía que sólo existían dos formas del carbono: el grafito y el diamante. El primero, como ya explicamos, es un material laminar (forma capas bidimensionales) y el segundo es un material con una estructura atómica tridimensional (no forma capas). El hecho de tener un material que forma capas sugiere que puede adquirir curvatura, como veremos más adelante. Pero antes, conozcamos algunas estructuras que se pueden formar con carbono y que demuestran la flexibilidad del grafito.

En 1985 Harold Kroto, de la Universidad de Sussex y sus colegas, Richard Smalley y Robert Curl de la Universidad de Rice, publicaron el descubrimiento de una nueva molécula de carbono compuesta por 60 átomos (C_{60} ; véase figura 2a) con la misma forma de una pelota de fútbol, a la que llamaron *buckminsterfullereno* en honor al arquitecto norteamericano que diseñó los primeros domos geodésicos: Richard Buckminster Fuller. Al mismo tiempo se encontró otra molécula cerrada con 70 átomos, menos abundante, que corresponde a un C_{70} alargado

Figura 1. a. Estructura en capas del grafito. b. Vista superior que muestra la estructura hexagonal de las capas de grafito. c. Estructura del diamante.

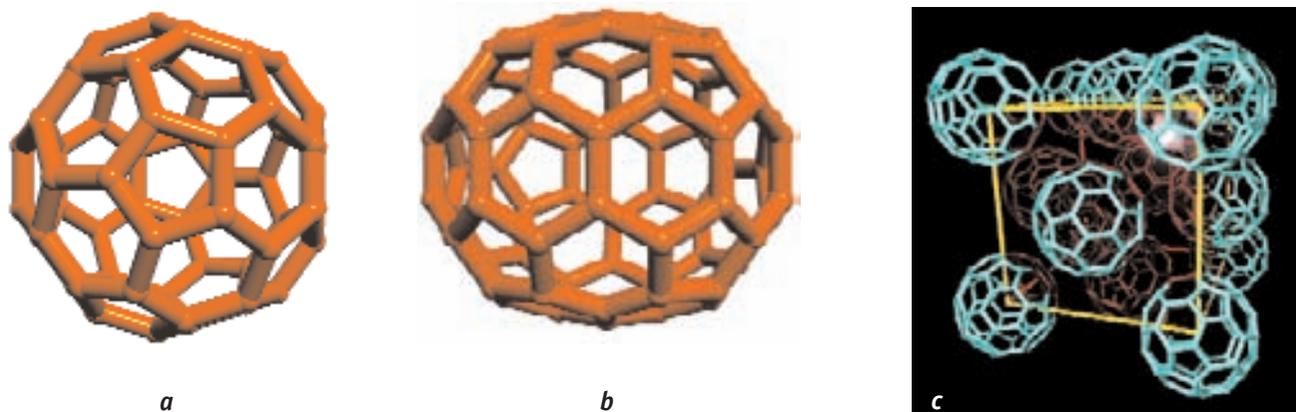


Figura 2. *a.* C₆₀ o buckminsterfullereno. *b.* C₇₀. *c.* Cristal cúbico centrado en las caras, formado por moléculas de C₆₀.

(véase figura 2*b*). Posteriormente, en 1990, Wolfgang Kratschmer y sus colegas reportaron la obtención de cristales de C₆₀ (véase figura 2*c*). En estos cristales, el C₆₀ se acomoda en las caras y vértices de un cubo. Al año siguiente Sumio Iijima, trabajando para la compañía NEC, encontró que el carbono podía formar fullerenos alargados o tubos muy pequeños, llamados nanotubos de carbono (véase figura 3). Estos descubrimientos han abierto nuevas áreas de investigación en física, química, biología y ciencia de materiales.

EL GRAFITO Y LAS SUPERFICIES CURVAS

El C₆₀ y los nanotubos de carbono son un ejemplo de la flexibilidad del grafito y de cómo éste, bajo ciertas circunstancias, puede doblarse o curvarse. De hecho, los nanotubos de carbono son el resultado de doblar una capa de grafito (compuesta por hexágonos de carbono) de la misma forma en que doblamos una hoja de papel para formar un cilindro. El C₆₀ puede obtenerse también a partir de una hoja de grafito, introduciendo anillos pentagonales de carbono; si introducimos exactamente 12 anillos pentagonales, la estructura puede cerrarse para formar un arreglo esférico. De este modo, es posible curvar el grafito de varias formas.

Partiendo de conceptos de geometría y topología, podemos proponer diferentes estructuras con interesantes propiedades.

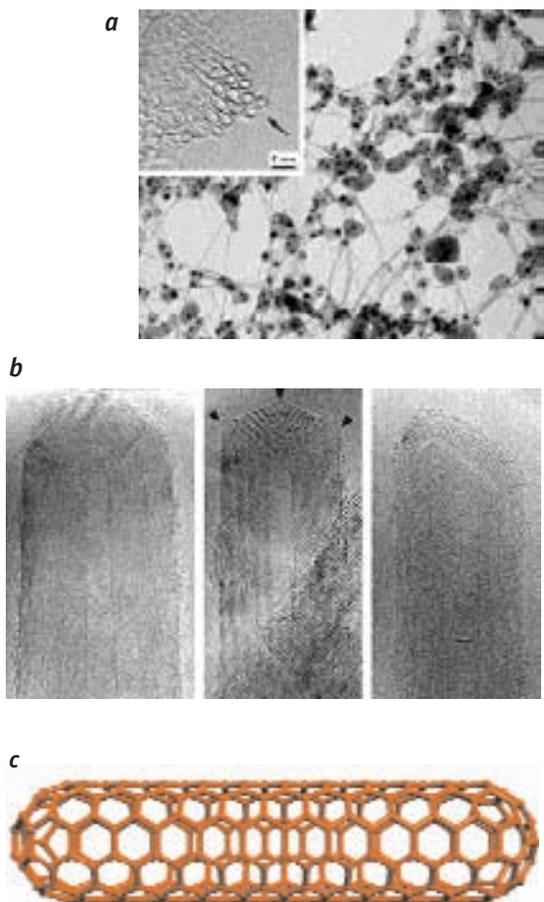


Figura 3. *a.* Nanotubos de carbono de una sola capa. En el recuadro se aprecia una sección transversal de haces de nanotubos de una capa con diámetro de 13 angstroms. *b.* Puntas de nanotubos de carbono concéntricos (con varias capas). *c.* Modelo de nanotubo cerrado con anillos pentagonales.

Para una superficie de grafito cerrada en la que no hay enlaces sueltos (cada átomo tiene tres primeros vecinos) tiene que cumplirse la siguiente ecuación:

$$N_5 - N_7 - 2N_8 = 12 (1 - g)$$

donde N_5 , N_7 , y N_8 corresponden al número de anillos pentagonales, heptagonales y octagonales de carbono, respectivamente; g es el género de la estructura y se refiere a la topología o forma de la misma. Es decir, al cambiar el valor de g , la forma cambia, y también la complejidad. Conforme aumenta “ g ” se obtienen arreglos atómicos más complicados. El valor de “ g ” para una esfera es cero, para una dona es 1. En otras palabras, g es el número de agujeros que podemos tener en nuestro arreglo. El número de hexágonos no se encuentra en la ecuación, ya que éstos no afectan la topología ni la curvatura de la estructura. Si $g = 0$ y no hay anillos heptagonales ni octagonales, entonces $N_5 = 12$, que es precisamente el número de anillos pentagonales que tenemos en el C_{60} y en un balón de fútbol. De hecho, podemos construir una estructura cerrada de grafito, sin importar el tamaño, únicamente con 12 pentágonos y un número cualquiera de hexágonos, excepto uno (véase figura 4).

NANOESTRUCTURAS CONCÉNTRICAS TIPO CEBOLLA

Iijima, en 1980, fue el primero en reconocer la estructura concéntrica de las partículas poliédricas de grafito presentes en películas delgadas de carbono amorfo depositadas en vacío. Posteriormente, en 1992, Daniel Ugarte observó dentro de un microscopio electrónico, que por medio de la irradiación de electrones era posible generar arreglos de carbono cuasiesféricos que recibieron el nombre de “estructuras tipo cebolla”.

Posteriormente, Iijima y Ugarte sugirieron que en el centro de las “cebollas” la molécula más pequeña era el C_{60} , lo cual implicaba que las moléculas mayores eran fullerenos gigantes. Sin embargo, surgió una interrogación: ¿cómo era posible obtener grafito cuasiesférico en fullerenos gigantes? Sabemos que, según la ecuación explicada anteriormente, para obtener una estructura cerrada de grafito basta con incluir 12 anillos pentagonales en una red hexagonal; el problema es que, a tamaños grandes, estos fullerenos presentan un facetamiento (las caras se hacen planas) que se acentúa conforme el fullereno crece (véase figura 5), lo que contrasta con las estructuras

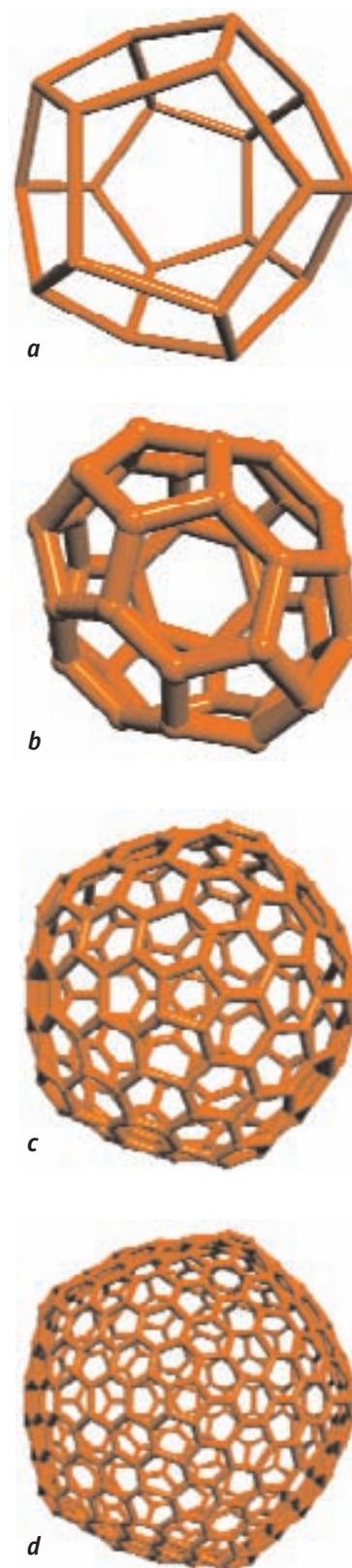


Figura 4. Familia de fullerenos: *a.* C_{20} , *b.* C_{40} , *c.* C_{240} , *d.* C_{540} .

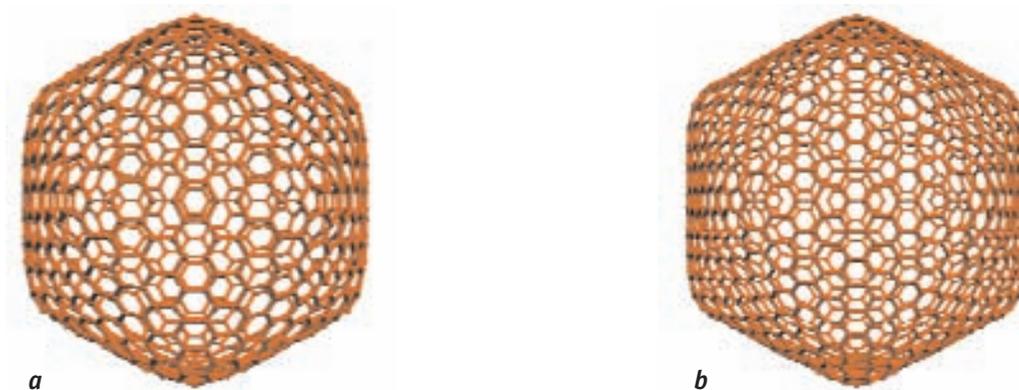


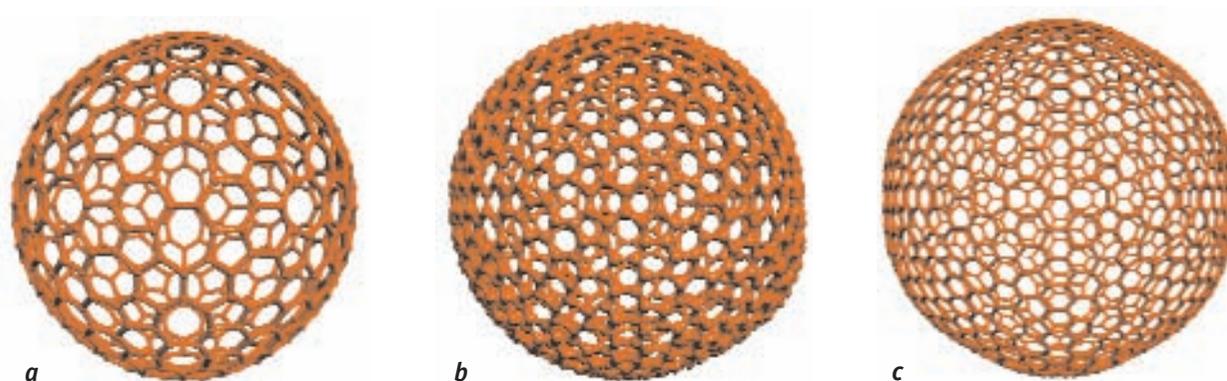
Figura 5. Fullerenos gigantes con 12 anillos pentagonales y un número arbitrario de anillos hexagonales, en los que al crecer aumenta el facetamiento: **a.** C_{960} , **b.** C_{1500} .

reportadas por Ugarte. Por lo tanto, había que explicar esta esfericidad.

Varios grupos en el mundo empezaron a abordar este problema y se sugirió que posiblemente otro tipo de anillos de carbono o enlace era el responsable (Terrones y Terrones, 1996). En 1997, el problema de la esfericidad fue explicado por un mecanismo que demostraba cómo las partículas poliédricas se podían transformar en “cebollas”, lo cual ya había encontrado experimentalmente Ugarte en 1993. Este mecanismo, propuesto por Humberto y Mauricio Terrones, consiste en mantener la topología esférica de un fullereno ($g = 0$ en la ecuación) añadiendo anillos heptagonales y también anillos pentagonales, además de los doce que ya existían (véase figura 6). Este tipo de cambios en la estadística de los anillos puede tener lugar porque cuando se obtienen las “cebollas” gráficas se introduce mucha energía en el sistema.

Figura 6. Fullerenos cuasiesféricos con anillos heptagonales, hexagonales y pentagonales: **a.** C_{540} , **b.** C_{888} , **c.** C_{1500} .

Asimismo se ha podido introducir metales magnéticos y carburos dentro de las “cebollas”, lo cual podría ser un medio de almacenar información (Jiao y Seraphin, 1996 y 1998). También, bajo tratamiento térmico e irradiación simultánea, se ha podido transformar el interior de las cebollas en diamante (Banhart y Ajayan, 1996). Los arreglos tipo cebolla se suman a



la familia de los fullerenos, pero existen otras posibilidades que describiremos a continuación.

NANOTUBOS DE CARBONO

Las nanoestructuras curvas que más atención han recibido son los nanotubos de carbono. Actualmente se publican más de 2.5 artículos de investigación diarios sobre este tema, debido a su gran potencial en diversas aplicaciones como emisores de electrones para pantallas de televisión ultradelgadas, transistores de un solo electrón para sistemas electrónicos ultrapequeños, puntas para microscopios de fuerza atómica y de tunelaje, sensores, almacenadores de hidrógeno y otros gases para celdas de energía, nanoalambres en dispositivos electrónicos, almacenamiento de datos de alta capacidad, materiales ultrarresistentes, pinturas conductoras, etcétera.

Existen tres diferentes tipos de arreglos atómicos en un nanotubo de carbono: los nanotubos “tipo sillón” (*arm-chair*), los “zig-zag” y los quirales (véase figura 7). Se ha encontrado que todos los nanotubos tipo “sillón” son conductores de electricidad. Los “zig-zag” en algunos casos son conductores y en otros semiconductores, y los quirales son semiconductores (Hamada y colaboradores, 1993). Los nanotubos de carbono pueden tener una o varias capas concéntricas, y sus propiedades electrónicas dependerán del tipo de nanotubos involucrados.

Se ha podido llenar el hueco interior de los nanotubos de carbono con varios elementos y compuestos (Harris, 1999). Quizá uno de los resultados más exitosos al respecto es introducir hierro en el interior de los nanotubos, de forma que tenemos un material ferromagnético confinado a una estructura tubular y que lo protege de la oxidación (Grobert y colaboradores, 1999). Es posible que en un futuro se usen estos nanotubos para almacenar grandes cantidades de información.

La presencia de defectos como anillos pentagonales o heptagonales de carbono en las estructuras gráficas cambia sus propiedades electrónicas. Al respecto, hemos propuesto capas cristalinas gráficas formadas por anillos de carbono con 5, 6 y 7 átomos a las que hemos llamado *haeckelitas*, en honor al biólogo Ernst Haeckel, quien dibujara radiolarios con motivos de pentágonos, hexágonos y heptágonos (Terrones y colaboradores, 2000); (véase figura 8). En las *haeckelitas* debe haber el

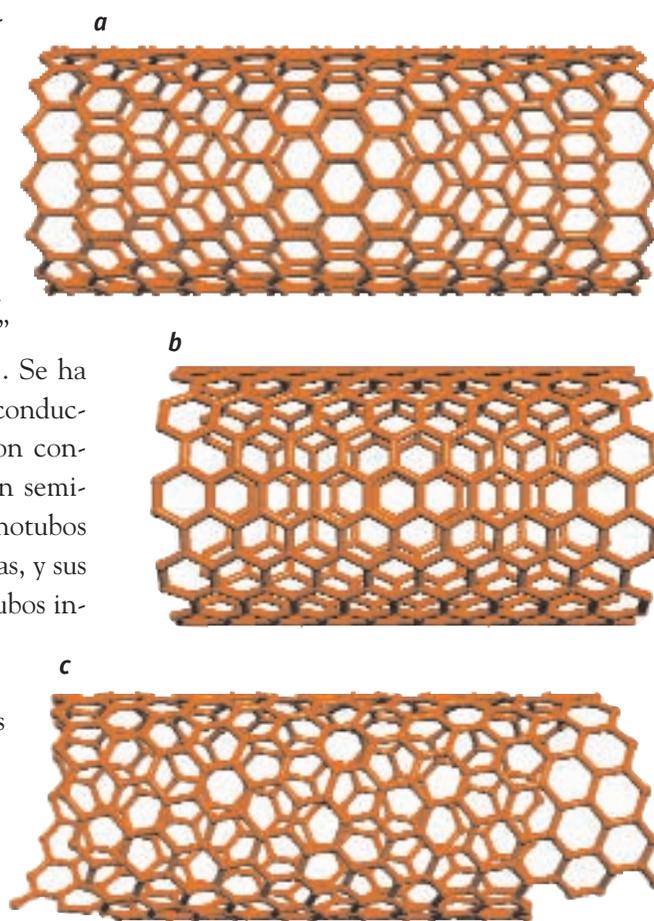


Figura 7. Nanotubos de carbono: **a.** nanotubo tipo “zig-zag”, **b.** nanotubo tipo “sillón” (*arm chair*), **c.** nanotubo quiral.

mismo número de anillos pentagonales y heptagonales, con la finalidad de compensar la curvatura positiva que producen los pentágonos y la negativa de los heptágonos. A diferencia de las hojas gráficas, que son semi-metálicas, las haeckelitas son todas metálicas, por lo que si las enrollamos para formar nanotubos, éstos también serán metálicos, sin importar el tipo de arreglo estructural. Al igual que los nanotubos de carbono, las haeckelitas son altamente rígidas (50 a 100 veces más resistentes que el acero). Una propiedad interesante de estos arreglos con defectos es que presentan paredes rugosas muy similares a las que se observan en nanotubos de carbono irradiados con el haz de electrones de un microscopio electrónico (véase figura 9).

El nitruro de boro es muy similar al grafito: forma capas hexagonales en las que los átomos de boro y nitrógeno se alternan. Cada átomo de nitrógeno está unido a tres de boro, y viceversa (figura 9). Usando experimentos de arco eléctrico y pirólisis, ha sido posible formar fullerenos y nanotubos de nitruro de boro (Chopra y colaboradores, 1995; Terrones y colaboradores, 1996a; Terrones y colaboradores, 1996b; Loiseau y colaboradores,

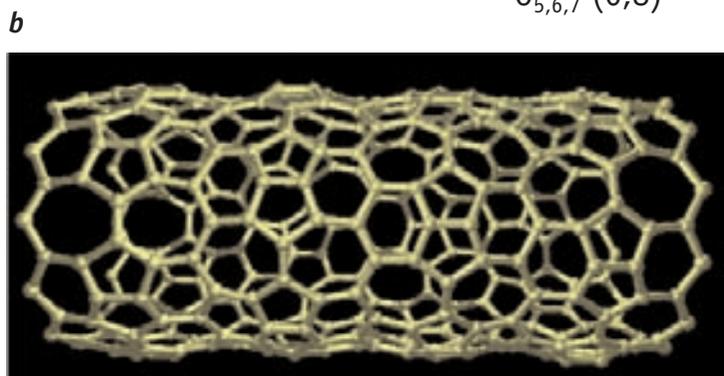
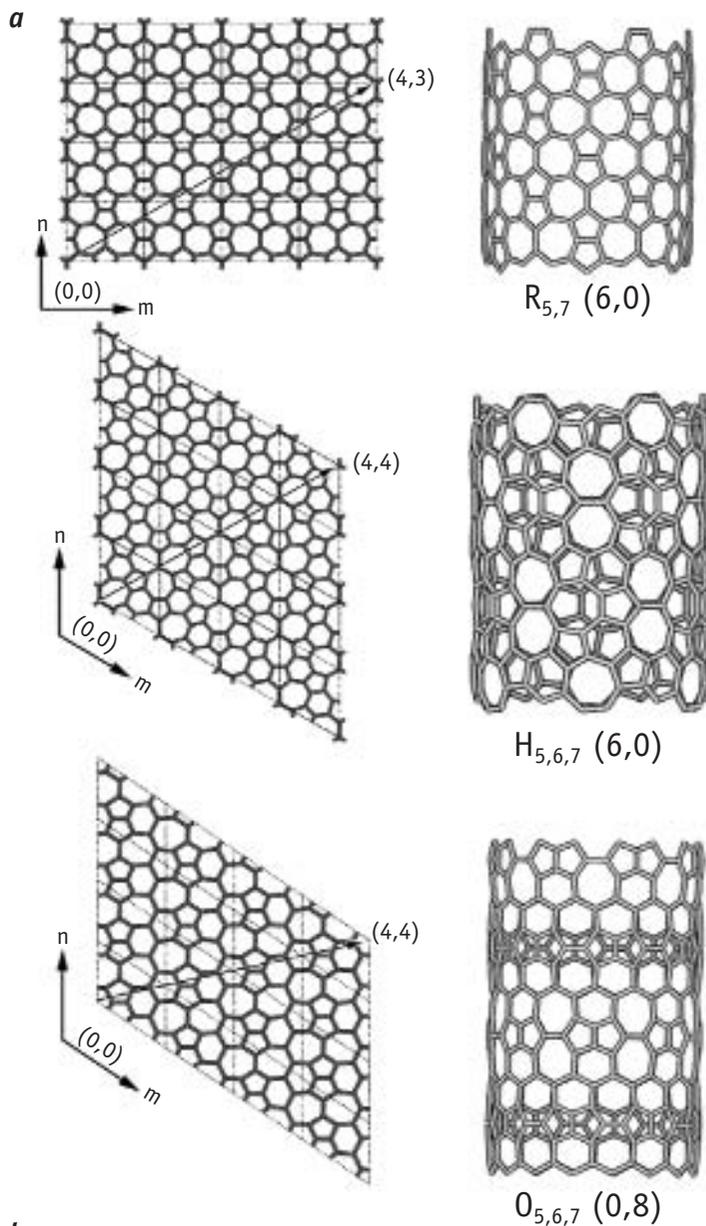


Figura 8. Diferentes tipos de arreglos gráficos con pentágonos, hexágonos y heptágonos llamados "haeckelitas": **a.** arreglos planos y su respectivo nanotubo; **b.** haeckelita con rugosidad. Todas las haeckelitas son conductoras.

Ha sido posible formar fullerenos y nanotubos de nitruro de boro

1996). Desde el punto de vista electrónico, los nanotubos de nitruro de boro son semiconductores. Ya que el boro, el carbono y el nitrógeno pueden formar enlaces covalentes, se han podido introducir en nanotubos de carbono algunos átomos de boro y nitrógeno, incrementando así la conductividad de los tubos (Czerw y colaboradores, 2001).

ESTRUCTURAS PERIÓDICAS DE CARBONO CON CURVATURA NEGATIVA

En 1991, Alan Mackay y Humberto Terrones fueron los primeros en proponer la inclusión de anillos de más de seis átomos de carbono (heptágonos y octágonos) en redes gráficas hexagonales, lo cual dio origen a nuevas estructuras hipotéticas periódicas de carbono. Estos nuevos arreglos presentan topologías muy similares a las superficies mínimas triplemente periódicas y a las zeolitas, ya que tienen canales en los que pueden alojarse moléculas. Se han hecho cálculos y se ha encontrado, por distintos métodos, que estas estructuras son muy estables, incluso más que el C_{60} (Lenosky y colaboradores, 1992; Vanderbilt y Tersoff, 1992; O'keefe y colaboradores, 1992). Geométricamente, como hemos explicado, los anillos heptagonales introducen curvatura negativa en el sistema, es decir, puntos de silla, por lo que a diferencia de los anillos pentagonales, los heptagonales abren el arreglo gráfico en lugar de cerrarlo, como en los fullerenos, por lo que pueden obtenerse arquitecturas periódicas (véase figura 10). Calculando el género g de estas estructuras periódicas de grafito se obtiene, usando la ecuación ya mencionada, que $g = 3$ por celda primitiva, y en otros casos puede llegar hasta $g = 4$ (Terrones y Mackay, 1993). Al incrementarse g , la complejidad de la estructura también aumenta. Dentro de las posibles aplicaciones de los arreglos periódicos con curvatura negativa se encuentran dispositivos semiconductores, nuevos catalizadores y filtros moleculares. Sin embargo, el grafito también nos da la posibilidad de obtener estructuras cuasiperiódicas por medio de la introducción de anillos de más de seis átomos (Terrones y Terrones, 1997b; véase figura 11).

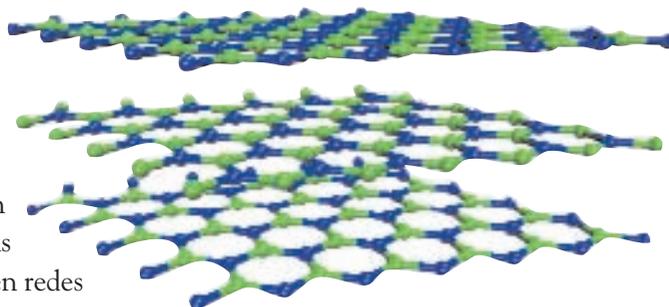


Figura 9. Estructura laminar del nitruro de boro (nitrógeno en azul, boro en verde).

Se han podido introducir en nanotubos de carbono algunos átomos de boro y nitrógeno, incrementando así la conductividad de los tubos

ESTRUCTURAS GRAFÍICAS CON ALTAS TOPOLOGÍAS

El grafito puede formar nanoestructuras cerradas (sin enlaces sueltos) más complejas, si incrementamos la componente de curvatura negativa. De esta manera, aumentamos el género, y por tanto el número de agujeros o cavidades del arreglo. Al

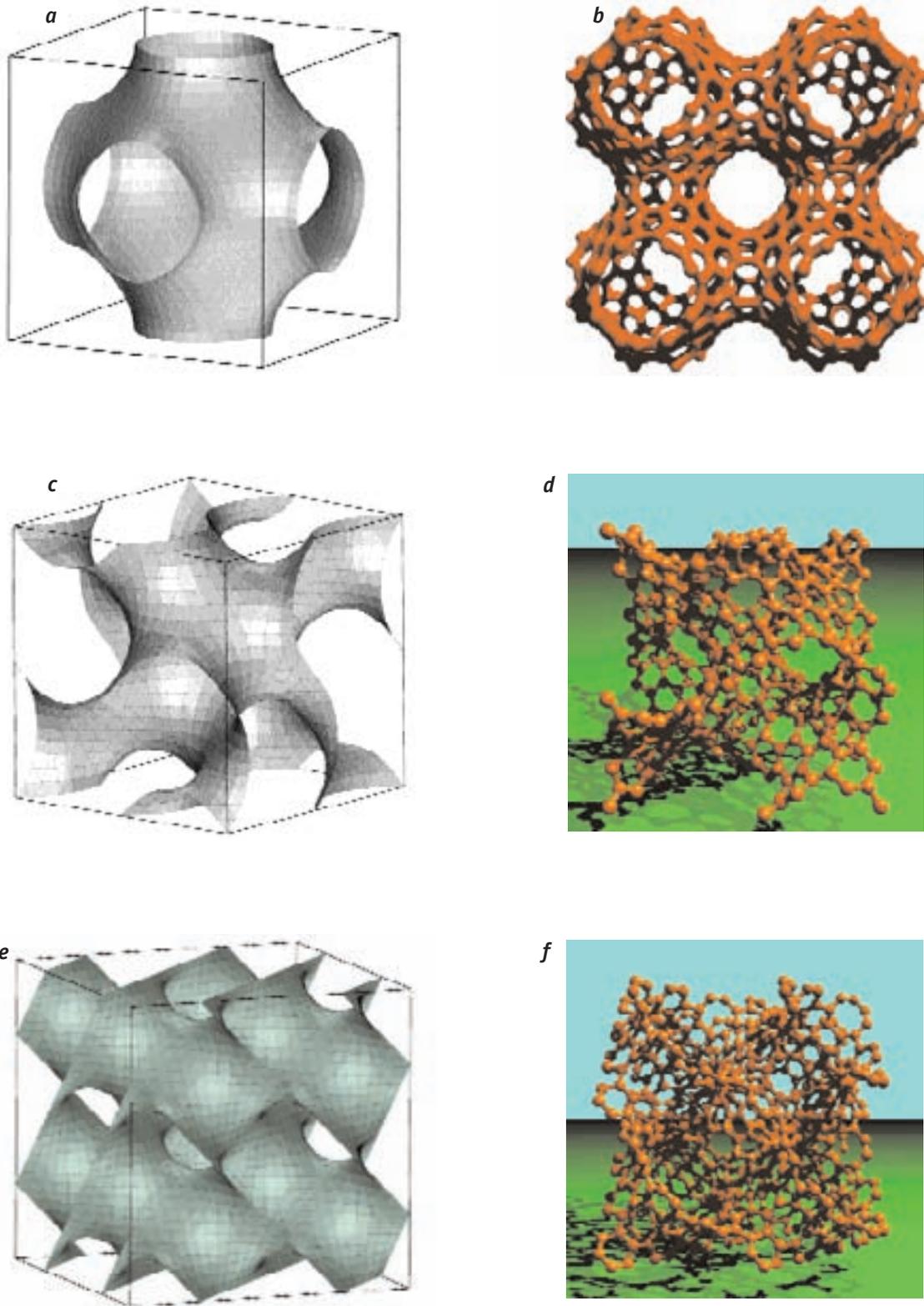


Figura 10. Superficies hiperbólicas decoradas con grafito usando anillos octagonales de carbono: *a.* celda cúbica de la superficie tipo "P" (primitiva), *b.* cuatro celdas de la superficie tipo "P" decorada con grafito, *c.* celda cúbica de la superficie tipo "G" (giroide), *d.* superficie "G" decorada con grafito, *e.* celda cúbica de la superficie "D" (diamante), *f.* superficie "D" decorada con grafito.

respecto, hemos propuesto nanoestructuras de carbono con altos géneros, las cuales presentan agujeros en los que pueden colocarse moléculas o átomos y así cambiar las propiedades electrónicas. En los agujeros el comportamiento es metálico, y lejos de éstos, el comportamiento es semi-metálico, similar al grafito (véanse figuras 12 y 13).

A diferencia de los fullerenos convencionales, en las arquitecturas complejas (altas topologías) existe un número considerable de heptágonos (curvatura negativa), mientras que no hay pentágonos (curvatura positiva). Asimismo, la presencia de hexágonos es indispensable, ya que proporcionan su carácter grafitico a la estructura y ayudan a la estabilidad de la misma. Aunque todavía estamos lejos de poder fabricar estructuras con altos géneros, existe evidencia experimental de la presencia de curvatura negativa. Por tanto, es importante seguir trabajando en esta dirección, ya que en un futuro podremos persuadir a los átomos de formar estructuras complejas con muy interesantes propiedades (Terrones y Terrones, 1997b; Ricardo-Chávez y colaboradores, 1997).

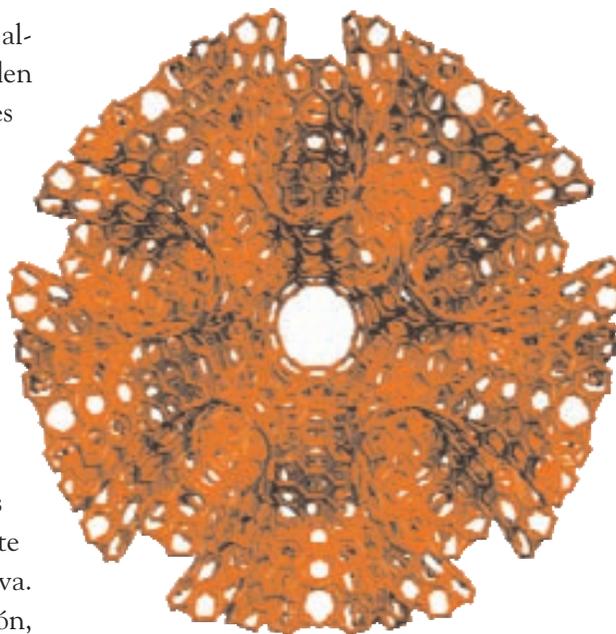


Figura 11. Porción de superficie cuasiperiódica icosaédrica decorada con grafito.

NANOCONOS DE CARBONO

El grafito ha seguido dando sorpresas: recientemente logramos la síntesis de nanofibras cónicas de carbono usando experimentos de pirólisis con compuestos de paladio (Terrones y colaboradores, 2001). A diferencia de los nanotubos de carbono, las nanofibras cónicas están unidas por las fuerzas débiles llamadas de van der Waals (más tenues que los enlaces químicos que normalmente unen a un átomo con otro), por lo que debería ser sencillo separarlas en sus componentes cónicas (véanse figuras 14 y 15). Es decir, podremos obtener diferentes tipos de nanoconos en cantidades suficientes para estudiar sus propiedades de transporte. Una de las propiedades principales de los nanoconos de carbono es que son buenos emisores de electrones, que podrían usarse en pantallas de televisión ultra-delgadas o en puntas de microscopios de tunelaje o fuerza atómica.

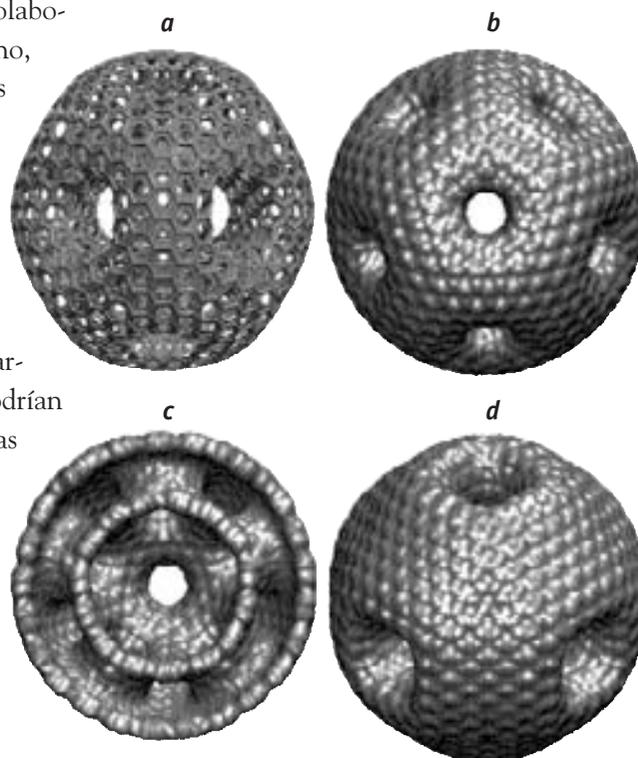


Figura 12. Fullerenos con altas topologías con anillos heptagonales y hexagonales: **a.** fullereno de género 11, con 2 040 átomos en su eje de simetría dos; **b.** fullereno de género 11, con 2 040 átomos en su eje de simetría 5; **c.** corte perpendicular del fullereno mostrado en el inciso (b); **d.** fullereno de género 5, con 1 896 átomos.

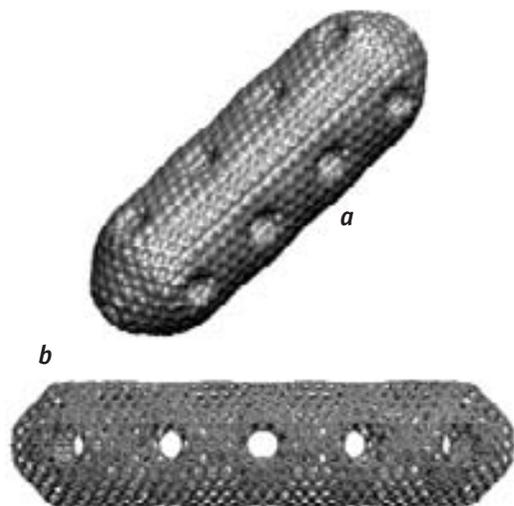


Figura 13. Nanotubos de carbono de altos géneros: *a.* nanotubo de género 17, con 2 880 átomos; *b.* nanotubo de género 21, con 3 568 átomos.

NANOTUBOS DE DISULFUROS

El grafito y el nitruro de boro no son los únicos materiales en capas: existen muchos más, como los disulfuros de molibdeno y tungsteno. Aunque éstos tienen una estructura atómica más complicada, se ha podido introducir curvatura para formar partículas cerradas y nanotubos (véanse figuras 16 y 17). Los cálculos de propiedades electrónicas indican que todos los nanotubos de disulfuro de tungsteno y molibdeno son semiconductores; sin embargo, si el diámetro disminuye también lo hace la brecha semiconductor (Seifert y colaboradores, 2000a y b). Lo anterior nos pone en posibilidad de generar semiconductores específicos a la medida de nuestras necesidades. Resultados teóricos recientes indican que los nanotubos de disulfuro de niobio son todos conductores (Seifert y colaboradores, 2000c). El tema de los disulfuros no está agotado, y es importante seguir trabajando en otros compuestos similares para poder introducir curvatura y así diseñar nuevos materiales. De la misma forma han podido obtenerse nanotubos de disulfuro de renio (véase figura 18).

CONCLUSIÓN

Los verdaderos avances en nanotecnología están apenas comenzando; los materiales laminares, sin lugar a dudas, jugarán un papel muy importante en los nuevos materiales del siglo XXI. La introducción del concepto de curvatura en los nanomateriales aporta una gran variedad de posibilidades con diferentes propiedades electrónicas y mecánicas.

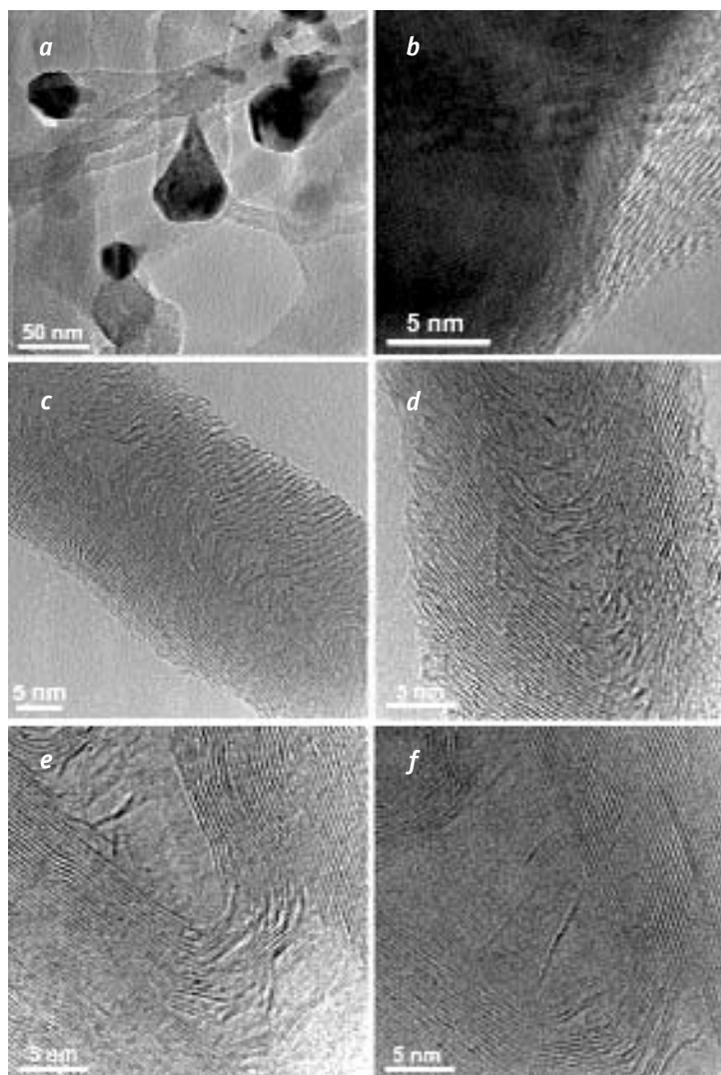


Figura 14. Nanofibras cónicas de carbono: *a.* imagen de microscopía de transmisión que muestra nanofibras con partículas cónicas de paladio en las puntas; *b.* detalle de alta resolución que muestra la red atómica del paladio en una nanofibra; *c., d., e. y f.* muestran diferentes tipos de nanofibras cónicas. El espaciamiento entre los planos atómicos entre los conos es de 0.34 nanómetros (la misma distancia que hay entre planos en los nanotubos de carbono).

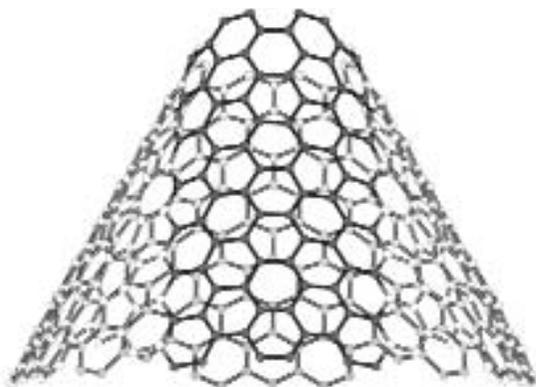


Figura 15. Modelo de cono grafitico abierto para explicar el arreglo atómico de las nanofibras cónicas.

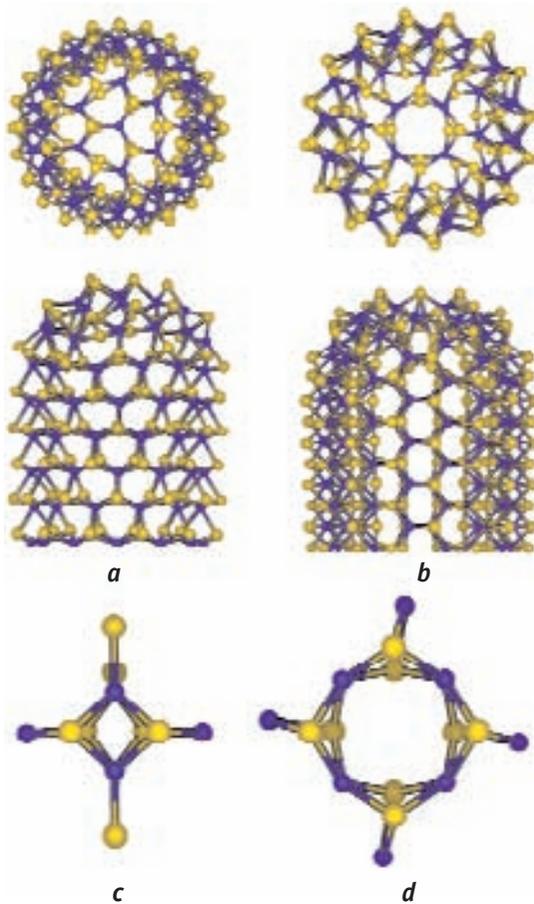


Figura 17. Punta cerrada de los tubos de disulfuro de molibdeno: *a.* tipo "zig-zag"; *b.* tipo "sillón"; *c.* se necesitan tres de estos defectos para cerrar la punta del tubo tipo "zig-zag"; *d.* se necesita un defecto de este tipo y cuatro del tipo mostrado en *c* para cerrar un tubo tipo "sillón".

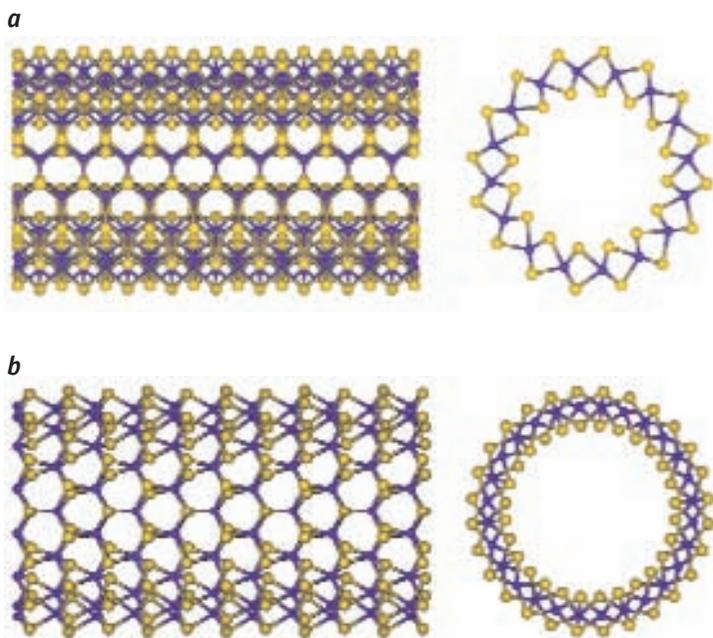


Figura 16. Nanotubos de disulfuro de molibdeno: *a.* tubo tipo "sillón", con su vista superior; *b.* tubo tipo "zig-zag", con su vista superior. Todos estos tubos son semiconductores.

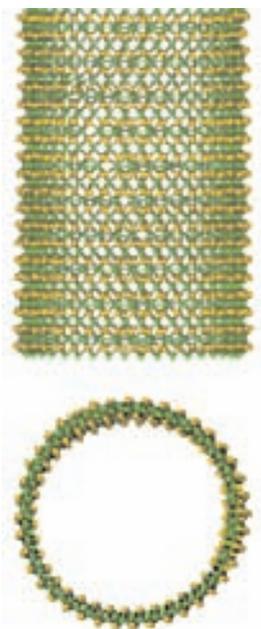


Figura 18. Nanotubo de disulfuro de renio y su vista superior.

Bibliografía

- Banhart, F. y P. M. Ajayan (1996), *Nature*, 382, 433-435.
- Castillo, R., K. Prassides, A. K. Cheetham, H. W. Kroto y D. R. M. Walton (1996), *Chemical Physics Letters*, 259, 568-573.
- Chopra, N. G., R. J. Luyken, K. Cherrey, V. H. Crespi, M. L. Cohen, S. G. Louie, y A. Zettl (1995), *Science*, 269, 966-967.
- Hamada, N., S. Sawada y A. Oshiyama (1992), *Physical Review Letters*, 68, 1579-1581.
- Harris, P. J. F. (1999), *Carbon Nanotubes and Related Structures*, Cambridge University Press.
- Iijima, S. (1980), *Journal of Crystal Growth*, 50, 675.
- Iijima, S. (1991), *Nature*, 354, 56-58.
- Jiao, J., S. Seraphin, X. K. Wang y J. C. Withers (1996), *Journal of Applied Physics*, 80, 103-108.
- Jiao, J. y S. Seraphin (1998), *Journal of Applied Physics*, 83, 2442-2448.
- Krätschmer, W., L. D. Lamb, K. Fostiropoulos y D. R. Huffman (1990), *Nature*, 347, 354-358.
- Kroto, H.W., J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl y R. E. Smalley (1985), *Nature*, 318, 162-163.
- Lenosky, T., X. Gonze, M. Teter y V. Elser (1992), *Nature*, 355, 333-335.
- Loiseau, A., F. Willaime, N. Demoncy, G. Hug y H. Pascard (1996), *Physical Review Letters*, 76, 4737-4740.

- Mackay, A. L. y H. Terrones (1991), *Nature*, 352, 762.
- O'keefe, M., G. B. Adams y O. F. Sankey (1992), *Physical Review Letters*, 68, 2325-2328.
- Ricardo-Chávez, J. L., J. Dorantes-Dávila, M. Terrones y H. Terrones (1997), *Physical Review B*, 56, 12143-12146.
- Rühle, M. y D. L. Carroll (2001), *Nanoletters*, 1, 457-460.
- Seifert, G., H. Terrones, M. Terrones, G. Jungnickel y Th. Frauenheim (2000), *Physical Review Letters*, 85, 146-149.
- Seifert, G., H. Terrones, M. Terrones, G. Jungnickel y T. Frauenheim (2000), *Solid State Communications*, 114, 245-248.
- Seifert, G., H. Terrones, M. Terrones y T. Frauenheim (2000), *Solid State Communications*, 115, 635-638.
- Terrones, H. y A. L. Mackay (1993), *Chemical Physics Letters*, 207, 45-50.
- Terrones, H. y M. Terrones (1997a), *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 58, 1789-1796.
- Terrones, H. y M. Terrones (1997b), *Physical Review B*, 55, 9969-9974.
- Terrones, H., M. Terrones, E. Hernández, N. Grobert, J.-C. Charlier y P. M. Ajayan (2000), *Physical Review Letters*, 84, 1716-1719.
- Terrones, H., T. Hayashi, M. Muñoz-Navia, M. Terrones, Y. A. Kim, N. Grobert, R. Kamalakaran, J. Dorantes-Dávila, R. Escudero, M. S. Dresselhaus y M. Endo (2001), *Chemical Physics Letters*, 343, 241-250.
- Terrones, M., A. M. Benito, C. Mantecadiego, W. K. Hsu, O. I. Osman, J. P. Hare, D. G. Reid, H. Terrones, A. K. Cheetham, K. Prassides, H. W. Kroto y D. R. M. Walton (1996), *Chemical Physics Letters*, 257, 576-582.
- Terrones, M. y H. Terrones (1996), *Fullerene Science and Technology*, 4, 517-533.
- Terrones, M., H. Terrones, Ph. Redlich, M. Rühle, R. Escudero F. Morales (1999), *Applied Physics Letters*, 75, 3363-3365.
- Ugarte, D. (1992), *Nature*, 359, 707-709.
- Ugarte, D. (1993), *Chemical Physics Letters*, 207, 473-479.
- Vanderbilt, D. y J. Tersoff (1992), *Physical Review Letters*, 68, 511-513.

El autor agradece su apoyo al Conacyt a través del proyecto W-8001 "Iniciativa del Milenio" y del proyecto 36365-E.

Humberto Terrones Maldonado hizo la licenciatura en ingeniería física en la Universidad Iberoamericana. Realizó el doctorado en el Birkbeck College de la Universidad de Londres, y el posdoctorado en el Departamento de Química de la Universidad de Cambridge en Inglaterra. Ha sido investigador titular del Instituto de Física de la UNAM. Actualmente es investigador titular C del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICT), nuevo centro SEP-Conacyt, desempeñando el cargo de jefe de departamento de Materiales Avanzados para la Tecnología Moderna. Ha publicado 89 artículos en revistas internacionales, numerosos artículos misceláneos y de divulgación, y 58 trabajos para congresos. Es especialista en teoría y experimento de nanoestructuras de materiales laminares y estructuras atómicas complejas, así como en matemáticas aplicadas al estudio de arreglos y nuevos materiales.