

La Molécula del Futuro

© Frank Christiny 1998
fchristiny@halnet.com

RESUMEN

Hasta hace poco tiempo a uno de los elementos químicos más estudiados por el Hombre, el Carbono, solamente se le conocían dos formas **alotrópicas** cristalinas. En 1985 esta situación cambió sorpresivamente. Una nueva forma de Carbono fue observada por un equipo de cinco químicos en el laboratorio del Departamento de Química de la Universidad Rice de Houston, en el Estado norteamericano de Texas. El nuevo miembro de esta ilustre familia será conocido en el mundo por el trabalingüístico nombre de buckminsterfullereno. La historia que siguió al primer anuncio de su observación en los perfiles espectroscópicos de Rice, la carrera por su sintetización, el natural escepticismo inicial del resto del estamento científico, el triunfo por su primera elaboración, y el desarrollo explosivo generado por sus prometedoras cualidades, conforman todos la clásica epopeya por la que atraviesan los grandes descubrimientos que jalonan la fascinante historia de la Ciencia.

ABSTRACT

One of the chemical elements most studied by scientists had only two well known allotropes. In 1985 this state of affairs changed unexpectedly. A new form of Carbon was observed by a team of five chemists at the laboratory of the Chemistry Department of Rice University in Houston, Texas. The new member of this illustrious family would become known to the world with the tongue-twisting name of buckminsterfullerene. The story that followed the first announcement of its observation in the spectroscopic logs at Rice, the race to synthesize it, the natural skepticism with which it was first received by the rest of the scientific

world, the triumph of its first production; and, the explosive development generated by its promising qualities, are all classical elements of the epic character of all great scientific discoveries.

Historia

En Septiembre de 1997 se cumplieron 12 años desde aquellos fantásticos 11 días que, según algunos, cambiaron la cara de la Química moderna. Durante aquellos días en el laboratorio del Departamento de Química de la Universidad Rice en Houston, Texas, EE.UU., los químicos Harry Kroto, Rick Smalley, Bob Curl y sus dos estudiantes de post-grado, fueron los primeros seres humanos en descubrir, es decir en observar y reconocer, una nueva forma de Carbono puro en la Naturaleza. Hasta entonces sólo se conocían otras dos formas naturales estables o *alotrópicas* del elemento Carbono: el diamante, uno de los más duros materiales conocidos y el grafito, uno de los más quebradizos [Nota 1].

¿Cómo es posible que nunca nadie haya observado antes esta tercera forma de Carbono siendo éste uno de los elementos más estudiados por el Hombre por tratarse del ladrillo constitutivo fundamental de la vida en la Tierra? Para ser exactos, sí fue observado --y muchas veces [Nota 2]. Sucedió que aquellos que lo vieron no lo reconocieron por lo que era: una forma no identificada de Carbono puro. Requirió de la mente investigativa y preparada de un grupo de científicos que, aunque no lo buscaban, una vez que se les apareció este nuevo enigma no cesaron hasta encontrar una explicación a sus "extrañas" observaciones.

Esta fantástica odisea de descubrimiento y sagacidad comienza cuando al científico inglés Harold Kroto de la Universidad de Sussex, se le ocurre pedir prestada una máquina de bombardeo y vaporización que utilizaban los químicos norteamericanos Richard Smalley y Robert Curl en sus experimentos en Rice para formar "racimos" (*clusters*) de átomos metálicos. En esta máquina, diseñada por Smalley, los científicos tejanos pueden vaporizar una barra de Silicio sometiéndola a altas temperaturas por medio de rayos láser hasta dislocar sus átomos convirtiéndolos en un plasma. En ella se alcanzan temperaturas "superiores a los diez mil grados", como acota Smalley, "fácilmente más caliente que la superficie de cualquier estrella". En la cámara de vacío del vaporizador se logran agrupar los átomos así dislocados gracias al ingenioso mecanismo de "soplar" los racimos con una nubecilla de gas de Helio, el cual al ser inerte no interviene en la reacción [Nota 3]. Cuando se logra una buena cantidad de estas cadenas de átomos agregados o racimos, se los analiza con un espectrómetro de masa para estudiar detenidamente su estructura.

Kroto, un astroquímico, buscaba una explicación para sus observaciones del Carbono estelar, "polvo estelar" como él lo llama. Estas observaciones son sumamente importantes para dar respuesta a una de las interrogantes más fascinantes de la Ciencia: ¿De dónde venimos? El Carbono es el elemento fundamental de la vida en nuestro planeta. ¿Cómo llegó hasta aquí? Astrónomos han sabido por mucho tiempo que la mayoría del Carbono de nuestro universo se formó en los núcleos de las estrellas relativamente poco tiempo después del *Big Bang*. Este nuevo material junto con otros recién creados viajó por el espacio hasta caer sobre los planetas en formación como verdadero maná vital. Solo en aquellos en los que las condiciones eran fértiles para la vida carbonífera, éste se consolidó con otros elementos para formar parte de los primeros microorganismos auto-replicantes. "En última instancia", nos decía el famoso astrónomo Carl Sagan en su popular serie *Cosmos*, "no somos más que polvo de las estrellas". Pero, ¿cómo y en qué condiciones llegó este elemento hasta la Tierra? Eso es justamente lo que estudian químicos-astrónomos como Harry Kroto. Usando espectroscopia de micro-ondas, él estudiaba la composición de estrellas ricas en Carbono cuyas atmósferas contienen cadenas alternadas de Carbono y Nitrógeno (cianopolienos). ¿Cómo se forman estos agregados?, se preguntaba Kroto. ¿Cómo se mantienen unidos estos conglomerados de manera que puedan viajar por la vastedad del espacio interestelar sin destruirse?

Una vez instalado en el laboratorio de Curl y Smalley, Kroto reemplazó el Silicio que ellos habían estado estudiando por el Carbono, que era lo que a él le interesaba investigar. Con la ayuda de los estudiantes-ayudantes, comenzó a analizar los agregados de átomos de Carbono que se encontraban en el plasma de su cámara de vacío, muy similares a los que él había encontrado en sus estudios de plasma estelar. Sin embargo, como ocurre en Ciencia a menudo, lo que se busca no es siempre lo que se encuentra. A poco andar, los análisis de Kroto y Smalley mostraron que existía una regularidad en el espectro de las cadenas de Carbono producidos: aparentemente a los átomos de Carbono les "gustaba" asociarse mayoritariamente en grupos de a 60 átomos. Mientras más repetían el experimento, más adeptos se ponían los experimentadores a producir estas pequeñas agrupaciones de 60 átomos. Pero, ¿por qué 60? ¿Qué tiene el número 60 que los átomos de Carbono lo prefieren sobre cualquier otro? [Nota 4].

Por muchos años hemos sabido que los átomos de Carbono se pueden combinar con otros de su misma especie en dos formas naturales: con otros cuatro para crear diamante o con otros tres para formar grafito. Esto se debe principalmente a que este elemento posee cuatro electrones en su última órbita con lo que puede establecer hasta cuatro enlaces covalentes. En el caso del diamante, estos cuatro enlaces están completos lo que redundará en la extrema dureza por la que es conocido. Cada estructura de cinco átomos de Carbono forma un tetraedro con

cuatro ángulos de 109,5 grados entre cada enlace (se ve como una pirámide regular de base triangular con un átomo en el centro de ella). Cada una de estas pirámides se une con otras para crear un enrejado tridimensional sumamente simétrico [Fig. 1].

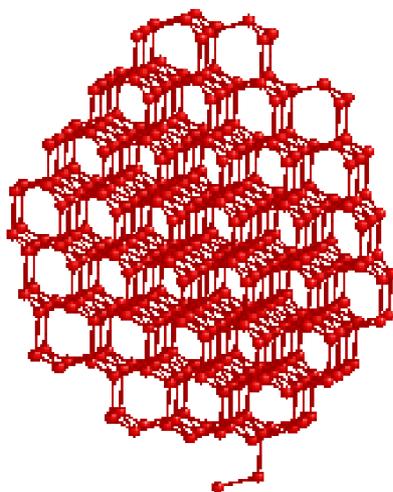


Figura 1: Moléculas de Carbono en forma de diamante.

En el caso del grafito, por otro lado, dos de los cuatro átomos compartirán un enlace bivalente; el resto será covalente. Estos cuatro átomos se unen en una formación llamada trigonal que consiste en un triángulo plano equilátero el cual contiene uno de los átomos en su centro geométrico. Estos triángulos elementales se unen a millones de otros de la misma estructura conformando así una hoja plana que luce como un verdadero "alambrado de gallinero" con células hexagonales. Cada una de estas hojas bidimensionales se deposita sobre otras de igual estructura escalonadamente [Fig. 2]. Todas ellas se pueden deslizar unas sobre otras fácilmente gracias a que están unidas sólo por *fuerzas de van der Waals* lo que le da al grafito esa sensación de "polvo" al frotarlo con el dedo. Cada hoja de este grafito está entonces conformada por extensas cantidades de polígonos de Carbono que se expanden en todas direcciones, como un plano infinito de azulejos hexagonales.

El problema para Kroto y sus ayudantes consistía en comprender cómo estas hojas interminables de su grafito de repente decidían separarse en conglomerados de 60 átomos. ¿Qué forma podría tener algo así? Ellos sabían que no podían quedar átomos con enlaces sueltos en los bordes de cada racimo; tenían

que unirse a algo [Nota 5]. ¿Pero a qué si no había nada más en la cámara al vacío de Smalley? Es aquí donde entramos al capítulo más emocionante de nuestra historia porque fue tratando de adivinar la forma de esta nueva estructura que la Ciencia entregó al mundo un nuevo ápice de conocimiento cuya potencialidad está aún por desarrollarse en toda su magnitud.

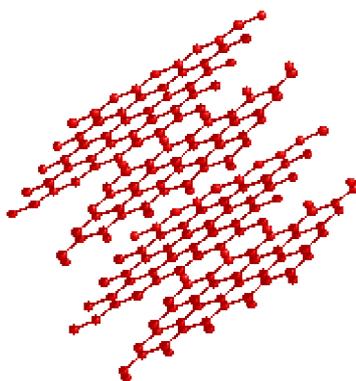


Figura 2: Moléculas de Carbono en forma de grafito.

Por esas coincidencias de la vida, ambos Kroto y Smalley habían visitado en 1967 la Exposición Mundial de Montreal donde la gran atracción la constituían las estructuras geodésicas de aquel visionario arquitecto y filósofo norteamericano Richard Buckminster Fuller (1895-1983). Cuenta Kroto que mientras se devanaba los sesos para comprender la estructura de sus intrigantes grupos de Carbono 60 (C_{60}), a él se le venían a la memoria las cúpulas geodésicas (*geodesic domes*) que había observado en aquella visita. De la misma manera como Fuller había resuelto su resistente techo curvo, las hojas planas de hexágonos de grafito de alguna manera tenían que curvarse para satisfacer todos los enlaces colgantes en los bordes de la estructura de C_{60} s. Sin embargo, sólo con hexágonos no se logra curvar una hoja plana. El secreto lo había resuelto "Bucky" Fuller muchos años antes al intercalar pentágonos entre los hexágonos! [Nota 6]. Esa fue la idea que recordó Smalley una noche mientras jugaba con sus hexágonos de papel tratando de resolver el puzzle. Recordó que había pentágonos a intervalos regulares entre los hexágonos de Fuller. Este momento eureka casi no le dejó dormir aquella noche. A la mañana siguiente presentó excitadamente su inspirada revelación al resto del equipo de Rice. Efectivamente, contando el número de átomos del C_{60} , se requería de 12 pentágonos regulares rodeados completamente por 20 hexá-

gonos regulares para producir una estructura cerrada, la cual satisfacía perfectamente todas las condicionantes geométricas y energéticas observadas.

¡Habían descubierto una nueva forma natural de organización del Carbono con la prosaica forma de una pelota de fútbol! [Fig. 3].



Figura 3.

Terminados los chequeos y cálculos confirmatorios, ahora únicamente quedaba anunciárselo al resto del mundo. El 14 de Noviembre de 1985 apareció por primera vez el histórico anuncio en la sección de cartas del semanario Nature, en un "humilde" artículo, el cual justamente muestra la foto que tomaron los autores en los jardines de Rice de una pelota de fútbol como una de las ilustraciones del mismo. En el simple título de la noticia se usaba por primera vez la palabra que fascinaría al mundo: " C_{60} : *Buckminsterfullerene*" [Fig. 4].

Luego del entusiasmo inicial, nuevas formas de agrupaciones cerradas de Carbono fueron siendo observadas y aisladas por Kroto y su equipo. Todas ellas obedecían la misma ley geométrica: pentágonos rodeados de hexágonos. Mas tarde se descubriría que la configuración mínima estable de estos racimos de Carbono es el C_{20} el cual consiste tan sólo de 12 pentágonos --un dodecaedro regular. A partir de éste, se agregan 2 o más hexágonos para obtener el resto de estos "fullerenos" (*fullerenes*) [Nota 7], como se conoce ahora a la serie completa [Nota 8].

No se crea que el mundo, sobre todo el escéptico mundo de los y las científicos, como es natural, aceptaría de buenas a primeras esta revolucionaria

propuesta. Después de todo, ¿dónde estaban estos fullerenos? ¿Cómo podía ser que otros químicos que habían trabajado por muchos años analizando grafito no lo hubiesen visto antes? En especial aquellos científicos quienes se llaman a si mismos "químicos del hollín" (*soot chemists*). Ellos argumentaban que en ningún experimento realizado por ellos hasta la fecha, se había observado C_{60} [Nota 9]. Para convencerlos a ellos y al resto de los expectantes observadores y observadoras sería necesario obtener este nuevo y veleidoso material en cantidades significativas y en una forma más permanente que las volátiles trazas dejadas por las muestras obtenidas hasta entonces. ¡Poco se imaginaban nuestros héroes que aquella búsqueda tomaría otros 5 años! Peor aun: que perderían la carrera por su obtención.

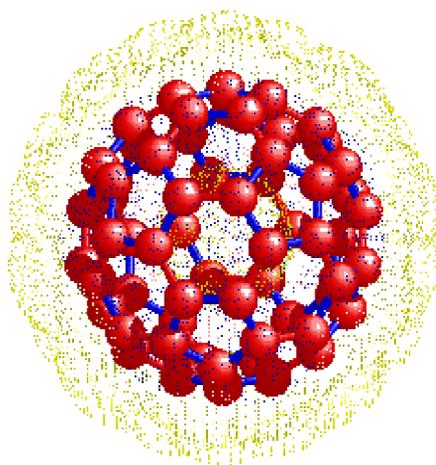


Figura 4: Molécula de buckminsterfullereno con nube de electrones.

Harry Kroto no era el único preocupado con las propiedades de los agregados de Carbono en el espacio. A principios de los `80, los físicos Don Huffman de la Universidad de Arizona y Wolfgang Kratschmer del Instituto Max Planck en Heidelberg trabajando juntos en el laboratorio de aquel prestigioso Instituto alemán, buscaban una explicación para las llamadas "bandas ínter-estelares difusas" (*diffuse interstellar bands*) o DIBs, recibidas desde las lejanas galaxias y que se proyectaban claramente en sus gráficos de absorción ultravioleta. (Es notable como nuevamente en nuestra historia nos encontramos con científicos mirando primero hacia las estrellas!) Tratando de emular los DIBs que describían sus gráficos, Huffman y Kratschmer, utilizaron una herramienta muy similar a la del grupo de Rice pero con corrientes eléctricas de muy alta tensión en lugar de los

rayos láser --una sofisticada soldadora al arco realmente. Con ella vaporizaban plasma de Carbono el cual era luego analizado por medio de un espectroscopio lumínico. En eso estaban cuando quedaron completamente fascinados con una inesperada forma que arrojaban sus análisis de este plasma de grafito en donde aparecían claramente dos "jorobas" (*camel humps*) en la gráfica resultante. Entre las hipótesis barajadas por estos intrigados científicos estaban desde la despectiva: "es probablemente basura", hasta la más especulativa: "es probablemente una nueva forma de Carbono!".

Hoy sabemos que la hipótesis correcta es la segunda. Una vez que Huffman y Kratschmer se enteraron del brillante descubrimiento realizado en Texas por Kroto et al, comenzaron a tratar de emular a sus colegas en la obtención del C_{60} . Sus denodados esfuerzos esta vez dieron los frutos esperados. En Septiembre de 1990, en el mismo semanario Nature apareció el artículo "*Solid C₆₀ : A New Form Of Carbon*", anunciando que sus autores, cuatro físicos, dos del Instituto Max Planck y dos de la Universidad de Colorado, habían logrado aislar macroscópicas cantidades del esquivo material por medio del simple expediente de disolver el hollín resultante de sus experimentos en una solución de benceno. Smalley diría más tarde: "Aquí, de repente, teníamos esta chocantemente simple técnica--por físicos, Dios mío, no por químicos--teníamos las primeras cantidades macroscópicas aisladas de [esta nueva forma de] Carbono". Con esta técnica ahora el mundo entero--al menos aquellos con soldadoras al arco--podía fabricar sus propios "bucky-balones" (*buckyballs*) o "buckys" como se les comenzó a llamar afectuosamente.

En 1991, el fullereno fue declarado la molécula del año por el semanario científico Science. Por su excitante descubrimiento, en 1996, Kroto, Curl y Smalley, recibieron el Premio Nóbel de Química. Y los honores no terminaron allí. A principios de este año, los estudiantes universitarios de los dos químicos tejanos, propusieron al Senado del Estado de Texas que se asignara al buckminsterfullereno como la molécula oficial del Estado de la estrella solitaria. Su argumento: si todo es grande en Texas, ésta gigantesca esfera de Carbono tiene que ser tejana! Con mayor razón si había sido descubierta en Texas (Rice University) y por científicos tejanos. Aunque efectivamente ambos Rick Smalley y Bob Curl son nativos del Estado, difícilmente Harry Kroto calificaría habiendo nacido a más de 8 mil kilómetros de distancia. Este pequeño "obstáculo" no disminuyó el entusiasmo de la Asamblea legislativa estatal la cual en Mayo de 1997 declaró oficialmente al C_{60} , el llamado buckminsterfullereno, como la molécula estatal de Texas.

¿Para qué sirven las *buckyballs*?

En un principio el entusiasmo por estudiar este novedoso compuesto llevó a muchos científicos a especular sobre sus probables usos. Entre ellos se ha mencionado que servirán desde portadores de drogas hasta rodamientos infinitesimales. Sin embargo, hasta ahora no se les ha encontrado ningún uso práctico industrial a pesar de que su potencial es efectivamente enorme. No hay duda alguna que la molécula tiene una dureza y compresibilidad formidables que la puede hacer competir ventajosamente con el diamantes; y que también puede servir como aditivo a lubricantes dado su altísimo punto de vaporización y viscosidad. Dada la maleabilidad de la molécula, según Smalley, dependiendo del compuesto, ésta puede servir paradójicamente de conductor o aislante eléctrico, de semiconductor o superconductor (Se pueden ver algunas de las características físicas y químicas en la [Nota 14]).

Entre las curiosidades que han aflorado en los últimos años de los laboratorios del mundo que están "jugando" con estas fascinantes formas de Carbono tenemos el nano-ábaco creado por los científicos del Laboratorio de Investigaciones de IBM en Zurich y el amplificador más pequeño del mundo diseñado en la Universidad Rice. Ambos modelos a nano-escala son réplicas perfectamente funcionales de sus contrapartidas en el mundo macroscópico. Otro equipo de científicos de la Rice logró cubrir la punta de un Microscopio Barredor de Efecto Túnel (*Scanning Tunneling Microscope* o STM), con un buckminsterfullereno. Con esta punta nanométrica pudieron manipular átomos individuales de grafito, efecto que no podrían haber logrado con una de las puntas metálicas normales que se utilizan en ese tipo de microscopio. Por su parte dos químicos del Laboratorio Nacional en Sandia, Albuquerque, EE.UU., lograron producir un filtro químico que permite el paso de moléculas gaseosas de cierto diámetro mientras impide el paso a otras más grandes. Metano, por ejemplo, no cruza una barrera de fullerenos pero Nitrógeno sí, por lo tanto se podría utilizar este principio para descontaminar el gas natural.

La explosión de investigaciones generadas por estas nuevas moléculas ha llevado a ciertos científicos incluso a revisar algunas de sus conclusiones previas. El geólogo del Instituto Scripps, Jeffrey Bada, decidió entregarle a su estudiante de post-grado, Luann Becker, una muestra de rocas provenientes del cráter meteórico de Sudbury, Ontario, Canadá, que le habían enviado años antes para su análisis. Efectivamente, utilizando la técnica de los pioneros en la obtención de fulleritas (*fullerites*) --la forma cristalizada de los fullerenos-- Becker obtuvo el característico color púrpura que producen estas al disolverse en tolueno [Nota 10]. Sin embargo, las sorpresas no se detuvieron allí. Al conocer de otros investigadores quienes habían logrado atrapar átomos dentro del enjaulado atómico que conforma convenientemente una *buckyball*, Bada y su equipo especularon que quizás el impacto del meteorito podría haber insertado algunos átomos dentro de los fullerenos [Nota 11]. Cuál no sería su sorpresa cuando al calentar las mues-

tras con fullerenos hasta que estos se rompen cual burbujas de jabón expuestas al aire se encontró en la cámara de vacío restos de gas Helio. Aun así, la siguiente sorpresa fue mayor: la cantidad de Helio no correspondía a la concentración de este gas en la atmósfera terrestre al momento del impacto del meteorito de Sudbury; y, dada la resistencia al impacto de estas durísimas esferas de Carbono, la conclusión lógica es que el Helio tiene que haber quedado atrapado antes de llegar a la Tierra! La expresión de Bada lo dice todo: "¡Eso nos desconcertó completamente!" ("*That blew our minds!*"). El único lugar desde donde puede haber provenido tal concentración de Helio es desde el vecindario de una estrella roja en proceso de extinción. La importancia de este descubrimiento es enorme porque predicaría la posibilidad de que otros elementos hayan viajado por el mismo método; incluyendo moléculas de gas carbónico, elemento esencial para la vida en este planeta, el cual no existía en grandes cantidades en la Tierra primordial [Nota 12].

Aun con todos estos prometedores descubrimientos, todavía no se ha encontrado un nicho industrial para la producción y explotación de los fullerenos. Como explica John H. Weaver, de la Universidad de Minnesota, se necesita suplir dos condiciones necesarias para que estos se conviertan en un producto competitivo. Primero, los fullerenos deben exhibir una propiedad tan destacada y extraordinaria que pudieran ser usadas para fabricar un producto útil que no exista hoy en el mercado. Y segundo, que sean competitivas con respecto a los productos existentes. Mientras no exista un método más barato que los actuales para su obtención y mientras las propiedades actuales sean inferiores o marginalmente superiores a las entregadas por materiales existentes, no habrá real interés por comercializar los sub-productos experimentales, en cantidades industriales. Es el caso, por ejemplo, de los prometedores fulléridos (*fullerides*) de Potasio, como el K_3C_{60} y el K_6C_{60} , los cuales bajo condiciones apropiadas pueden convertirse en semi-conductores o en super-conductores.

El futuro

A pesar de las dificultades, el mundo de la Ciencia continúa tratando de encontrarle una utilidad rescatable a estas fascinantes y hermosas moléculas. Algo similar ocurrió después del descubrimiento del benceno en 1825 por Faraday. El mundo científico tardó decenas de años en encontrarle una utilidad práctica a este compuesto *aromático* y vibrante hexágono regular [Fig. 5]. Fue sólo 20 años más tarde que se lo logró extraer en cantidades industriales del carbón coque y es sólo en este siglo que la gran variedad de productos derivados del benceno ha sido explotada; no siendo la menos significativa de ellas la conformada por los plásticos y sus derivados.

Esto muestra como el avance del conocimiento científico funciona en

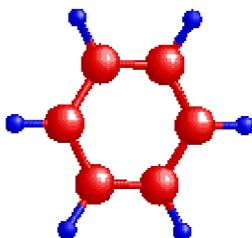


Figura 5: Molécula de benceno con átomos de Hidrógeno.

forma similar a aquella teoría que el gran evolucionista de la Universidad de Harvard, Stephen Jay Gould, le ha dado en llamar la "evolución por saltos" o *punctuated equilibria*. Cada cierto tiempo atravesamos por una verdadera explosión Cámbrica en las Ciencias. Desde que en 1991, el químico japonés Sumio Iijima de la compañía NEC, produjo los primeros tubos microscópicos de Carbono constituidos por fullerenos, ha habido una verdadera avalancha de estudios sobre los mismos. Los nano-tubos consisten en elongaciones casi infinitas del C₇₀ el cual no es más que un buckminsterfullereno con un cinturón adicional de 10 átomos de Carbono. Bandas de estos grupos de 10 átomos se pueden adicionar indefinidamente lo que a llevado a Smalley a decir que estos microscópicos tubos son la línea unidimensional más platónica ya que no se podría construir ninguna otra con un diámetro más pequeño. Estos nuevos productos se han llamado indistintamente nano-tubos o "bucky-tubos" (*buckytubes*) [Nota 13]. Dada las características conductivas de los fullerenos, con los nano-tubos se podrían construir los primeros nano-conductores dándole un nuevo grado de miniaturización a la industria de los semi-conductores; o las primeras cañerías de la prometedora nano-industria del futuro.

Desde que se descubrió como fabricar estas atractivas y multifacéticas moléculas, no transcurre un día sin que se anuncie un nuevo pariente de la familia "bucky": las "bucky-cebollas" (*buckyonions*) y las "bucky-canastas" (*buckybaskets*) o "bucky-bolos" (*buckybowls*) que aparecieron en 1996 y los

"bucky-donuts" (*buckydoughnuts*) observados recién en 1997. Eventualmente la preciosa molécula gigante que descubrieran tan serendipitamente los científicos de Texas, podría resultar ser el benceno del próximo siglo --con todos sus posibles derivados.

Mientras tanto resulta irónico observar que las investigaciones originales que redundaron en tan prometedor descubrimiento, no han servido para comprobar o refutar las hipótesis que barajaban los astroquímicos involucrados en aquellos proyectos: todavía no se sabe a ciencia cierta qué causa los *clusters* ínter-estelares de cianopolienos que estudiaba Kroto, como tampoco sabemos cuál es la causa de las bandas ínter-estelares difusas que indagaban Huffman y Kratschmer. Lo cierto es que la dramática historia del descubrimiento de los fullerenos se encuadra perfectamente en el gran guión épico de la historia general de las Ciencias, con todas sus falencias, éxitos, disputas, apasionamientos, errores y auto-correcciones, es decir, confirma una vez más, el carácter intrínsecamente humano que aún posee el tratamiento de las Ciencias de finales del milenio.

Notas

1. Realmente existe una tercera forma *alotrópica* del Carbono pero ésta no es cristalina. Se le conoce con el nombre de Carbono Amorfo y su expresión más conocida es el "negro de carbón" o tizne.
2. Entre las observaciones reportadas antes del descubrimiento definitivo existen las de Osawa en 1970; Day y Huffman en 1973; Rohlfing, Cox y Kaldor en 1984; y las de Bloomfield, Geusic, Freeman y Brown, en Junio de 1985.
3. Kroto et al, probaron con presiones de desde 10 a 760 torrs. En cambio Kratschmer et al, lo consiguieron a presiones de ~100 torrs.
4. 70 también se producía notoriamente pero en menor cantidad que 60.
5. En el diamante las terminaciones están constituidas por átomos de Hidrógeno.
6. Bucky, pronunciado "baquí", es el diminutivo de Buckminster en inglés.
7. La razón para escoger la terminación -eno en el nombre de los fullerenos en castellano, proviene de las reglas denominativas de la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*). Según estas reglas la terminación -ano corresponde a los denominados "alcanos", hidrocarburos saturados en los cuales los átomos de Carbono están unidos por un solo enlace de valencia. La terminación -eno, por su parte, corresponde a los denominados "alquenos", hidrocarburos en los cuales los átomos de Carbono están unidos por un doble enlace (i.e. eteno o etileno). Finalmente, la terminación -ino corresponde a los denominados "alquinos", hidrocarburos en los cuales los átomos de Carbono están unidos por un triple enlace (i.e. etino o acetileno).
8. En la prensa de habla francesa se las llamó "footballenes".
9. En especial, se opuso al grupo de Rice el único otro equipo en el mundo que poseía una copia de la máquina diseñada por Smalley: los químicos de la compañía Exxon. La disputa entre estos dos grupos de profesionales duró por cinco años--hasta que se logró aislar fullerenos en cantidades visibles-- ventilándose tanto en la literatura especializada como en conferencias y foros públicos llegando, según algunos, a tener ribetes vergonzosamente poco científicos.

10. Como en el grafito, las moléculas de C_{60} en la fullerita están unidas por *fuerzas de van der Waals* solamente. Por otro lado, al contrario que el grafito o el diamante, la fullerita no necesita de terminaciones no-carbónicas: es un cristal perfectamente puro!
11. Debido al gran tamaño del volumen interno encerrado por el inmenso entarimado molecular (o endoedro como se le ha dado en llamar) de un buckminsterfullereno, se calcula que cualquier átomo de la Tabla Periódica puede caber cómodamente dentro de una de las bucky-esferas. Este tipo de molécula enclaustradora no es nueva para la Química: se la conoce con el nombre genérico de *clatrato*.
12. También el mineralógico ruso Semeon Tsipursky de la Universidad de Arizona, en 1993 descubrió C_{60} en sus muestras de shunguita, una roca proveniente del noroeste de Rusia. La importancia de este descubrimiento se debe a que ésta era la primera vez que se observaban ejemplos de fullerenos en forma natural. En un acto de serendipitez, el científico, quien no esperaba encontrarse con tal sorpresa, mientras estudiaba la naturaleza del Carbono en su roca, descubrió que su muestra exhibía la característica formación de fulleritas o fullerenos cristalizados cuando se las miraba a través de un microscopio electrónico de alta resolución.
13. En el caso de los llamados bucky-tubos, los investigadores han encontrado que el fenómeno que permite el crecimiento y propagación de esta clase de fullerenos es la intercalación de heptágonos a la vez que de pentágonos entre los hexágonos naturales del grafito. Dependiendo del número de estos polígonos regulares en el enrejado, una superficie plana se logra curvar como una silla de montar o como un cono, o se puede cerrar sobre si misma para formar icosaedros truncados (buckminsterfullerenos) o cilindros cuasi-infinitos (bucky-tubos). De hecho, los topólogos han determinado que si en el mar de hexágonos se insertan 12 pentágonos más que heptágonos, la figura resultante será cerrada. (El caso mínimo es 0 heptágonos => un dodecaedro).
14. Algunas características físicas y químicas de los fullerenos:
 - 14.1. Tamaño del fullereno = $\sim 3,57 \text{ \AA}$ (357 pm) de radio.
Separación entre átomos = $\sim 1,47 \text{ \AA}$ (enlaces hexagonales), $\sim 1,40 \text{ \AA}$ (enlaces pentagonales).
Distancia entre moléculas = $\sim 10,0 \text{ \AA}$ (de centro a centro). Cavidad interior = $\sim 5,0 \text{ \AA}$ de diámetro.
 - 14.2. Masa molecular del fullereno = 720,64.
 - 14.3. Potenciales de ionización = Primera: 7,65 eV. Segunda: 19 eV.
 - 14.4. Dureza = Las moléculas de fullereno sobreviven sin romperse impactos de hasta 27.000 Km/h contra placas de acero.
 - 14.5. Compresibilidad = Resiste presiones de hasta 22 GPa (~ 220.000 atms) sin cambiar de fase de transición. Esto es más del doble que la del diamante.
 - 14.6. Elasticidad = Un cristal de fullereno se puede comprimir al 70 % de su tamaño a 3.000 atms. sin deformarse volviendo a su densidad normal al reducirse la presión.
 - 14.7. Vibraciones = El fullereno tiene 174 modos de vibración.
 - 14.8. Revoluciones = A temperatura ambiental, dada su simetría, cada molécula gira a 18×10^9 rev/sec en estado cristalino! Esto es solo un tercio del número de revoluciones en estado gaseoso. Recién cerca de los $90 \text{ }^\circ\text{K}$ se detienen completamente las revoluciones.
 - 14.9. Número de isómeros conocidos = 1.812.
 - 14.10. Superconducción = Cristal de fullereno dopado con metales alcalinos, como el Cs_2RbC_{60} , comienza a superconducir a la "altísima" temperatura de $33 \text{ }^\circ\text{K}$. (El Japanese National Research Institute for Metals ha reportado temperaturas de superconducción que alcanzan los $57 \text{ }^\circ\text{K}$, pero hasta ahora estos resultados no se han podido reproducir en otros laboratorios. De confirmarse, ésta sería la temperatura más caliente para un superconductor metálico. El "récord" corriente es de $77 \text{ }^\circ\text{K}$ y lo tienen los óxidos cerámicos, i.e. de Itrio o de Bario).

- 14.11. Solubilidad = El cristal de fullereno no es muy soluble: a temperatura ambiental la solubilidad va desde 0,01 g/L en metanol hasta 50 g/L en 1-cloronaftaleno.
- 14.12. Energía de formación = 11,2 Kcal/mol. Compáreselo con la del grafito que es de 1,5 Kcal/mol solamente. Las temperaturas de formación usadas hasta ahora varían entre los 1100 y los 1300 °C con presiones de alrededor de los 100 torrs.
- 14.13. Energía de activación = 70-80 Kcal/mol para un proceso de primer orden.
- 14.14. Inserción de átomos = Desde un comienzo se ha logrado atrapar átomos metálicos y de cada uno de los gases nobles dentro de las celdas de los fullerenos. (Ya en 1985, Smalley et al. lo habían logrado con átomos de Lantano). A estos nuevos compuestos endoédricos se los designa: A@C₆₀, i.e. La@C₆₀. La introducción de He se logra a temperaturas de 650 °C a 3000 atms por una hora. Se logra expulsar a los átomos atrapados, para su subsecuente medición por espectroscopia, elevando la temperatura hasta los 1000 °C.
- 14.15. Evaporación = Debido a las débiles fuerzas de atracción actuando entre las moléculas, la fullerita se disuelve a alrededor de los 300 °C.
- 14.16. Simetría = El fullereno es la molécula más esférica y simétrica conocida: tiene una esfericidad de 94%.

Bibliografía

- Kroto, H.W.; Heath, J.R.; O'Brien, S.C.; Curl, R.F.; Smalley, R.E. "C₆₀: Buckminsterfullerene." *Nature* 318, 14, 162-163 (11/14/85).
- Kraetschmer, W.; Lamb, L.D.; Fostiropoulos, K.; Huffman, D.R. "Solid C₆₀ - A New Form Of Carbon." *Nature* 347, 6291, 354-358 (9/27/90).
- Verhovek, Howe. "It May Not Be Real Big, but Texas Is Taking to the Molecule." *The New York Times* (02/13/97).
- Regueiro, Manuel Nunez; Monceau, Pierre; Hodeau, Jean-Louis. "Crushing C(60) to Diamond at Room Temperature." *Nature* 355, 6357, 237-239, Jan 16, 1992.
- Campbell, Samuel E; Luengo, Gustavo; Srdanov, Vojislav; Wudl, Fred; Israelachvili, Jacob N. "Very low viscosity at the solid-liquid interface induced by adsorbed C₆₀ monolayers." *Nature* 382, 6591, 520-522, Aug 8, 1996.
- Curl, Robert F; Smalley, Richard E. "Fullerenes." *Scientific American* 265, 4, 54- 63, Oct 1991.
- Cuberes, M T; Schlittler, R R; Gimzewski, J K. "Room-Temperature Repositioning of Individual C₆₀ Molecules at Cu Steps: Operation of a Molecular Counting Device." *Applied Physics Letters* 69, 20, 3016-3018, Nov 11, 1996.
- Hellemans, Alexander. "Trapped buckyball turns up the amp." *Science* 275, 5303, 10 69, Feb 21, 1997.
- Kelly, K F; Sarkar, D; Hale, G D; Oldenburg, S J; Halas, N J. "Threefold electron scattering on graphite observed with C₆₀-adsorbed STM tips." *Science* 273, 5280, 1371-1373, Sep 6, 1996.
- Assink, R.A.; Schirber, J.E.; Loy, D.A.; Morosin, B.; Carlson, G.A., "Intercalation Of Molecular Species Into The Interstitial Sites Of Fullerene." *Journal of Materials Research* 7, 8, 2136-2143 (8/92).
- Saunders, Martin; Cross, R James; Jimenez-Vazquez, Hugo A; Shimshi, Rinat; Khong, Anthony. "Noble gas atoms inside fullerenes." *Science* 271, 5256, 1693 -1697, Mar 22, 1996.
- Becker, Luann; Poreda, Robert J; Bada, Jeffrey L. "Extraterrestrial Helium trapped in fullerenes in the Sudbury impact structure." *Science* 272, 5259, 249-252, Apr 12, 1996.
- Weaver, John H. "Ask the Experts: Quemistry: Have buckminsterfullerenes been put to any practi-

- cal uses?" Scientific American Web Page, July 14, 1997.
- Hebard A. F.; Rosseinsky M. J.; Haddon R. C.; Murphy D. W.; Glarum S H.; Palstra T. T. M.; Ramirez A. P.; Kortan A. R. "Superconductivity at 18 °K in Potassium-doped C₆₀." Nature 350, 6319, 600-601, Apr 18, 1991.
- Crabb, Charlene. "More Fun With BuckyBalls." Discover 14, 1, 73. Jan, 1993.
- Kroto, H.W. "C₆₀ - Buckminsterfullerene, The Celestial Sphere That Fell To Earth." Angewandte Chemie - International Edition In English 31, 2, 111-129 (2/92).
- Gould, S. J. "The meaning of punctuated equilibrium and its role in validating a hierarchical approach to macroevolution," in Perspectives on Evolution. R. Milkman (ed). Sunderland, Mass.: Sinauer. pp. 83-104. 1982a.
- Holden, Constance. "Better buckies through chemistry." Science 273, 5281, 1495, Sep 13, 1996.
- "Where's the Bucky Joe?" Discover 18, 6, 27. Jun., 1997.
- Sagan, Carl. Cosmos. New York, Random House, 1983.
- Race to Catch a Buckyball. TV, Narr. Peter Thomas. Written and produced by John Lynch. NOVA Show #2216. First Air Date: December 19, 1995.

Punteros de Interés

American Scientist Article: Fullerene Nanotubes: C_{1,000,000} and Beyond

<http://www.amsci.org/amsci/articles/97articles/Yakobson.html>

Breakthrough! #18.5 (1997/04/01)

http://www.lucifer.com/~sean/BT/18andhalf.html#state_molecule

Buckminsterfullerene

<http://mgm.mit.edu:8080/pevzner/bucky/fullerene.html>

Bucky News Service

<http://www.physik.uni-oldenburg.de/bucky/htmls/bucky.html>

Buckyball, UT entry collide in bid to be Texas state molecule

http://www.nando.net/newsroom/ntn/health/022097/health1_24589.html

Building a buckyball: NOVA

<http://www.pbs.org/wgbh/pages/nova/autumn95tguide/buckactivity.html>

C₆₀ in VRML

<http://buckminster.physics.sunysb.edu/c60vrml.html>

C₇₀ Fullerene

<http://rmm.riken.go.jp/musr/c70/c70.html>

Chemical of the Week -- Buckyballs

<http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/buckball/buckball.html>

Fullerene Patent Database

<http://mgm.mit.edu:8080/pevzner/Bucky/Patents.html>

Glosario

Alotropía: cuando existen formas estructuralmente diferenciadas de un mismo elemento las cuales, por tanto, poseen características químicas y físicas notoriamente diferentes entre sí. Por ejemplo, el Fósforo posee tres formas alotrópicas: los llamados Fósforos blanco, rojo y negro.

Aromático: perteneciente al grupo de compuestos químicos que contienen anillos hexagonales estables. Estos son característicos de los derivados del benceno (i.e. naftaleno), pero no todos

necesariamente contienen anillos de puros átomos de Carbono, pueden contener Oxígeno u otro elemento en el anillo (i.e. furano).

Clatratos: llamados también, compuestos de inclusión, los cuales no están unidos por los enlaces normales entre compuestos --covalentes o metálicos o enlaces débiles como los de van der Waals (ver abajo)-- sino que mas bien parte de ellos resulta enclaustrada por el resto de la estructura geométrica de las moléculas que lo conforman. Hidroquinona era uno de los ejemplos clásicos de clatratos; esto es, hasta la aparición de los fulléridos. A estos últimos, al contener Carbono, se les conoce también con el nombre de carcerandos (carcerands), una subclase de clatratos.

Van der Waals, fuerza de: atracción generada entre átomos cuando existe una nube compartida de electrones libres que circula de uno a otro redundando en una unión que --aunque débil y transitoria-- los mantiene ligados.

Frank Christiny Ingeniero de Software para Halliburton, Inc. Estudió Ingeniería Eléctrica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente, es estudiante de Magister en Ciencias de la Computación en la Universidad de Houston. Ha trabajado en software para compañías inglesas especializadas en navegación y radio-posicionamiento y en Halliburton, donde trabaja desde mediados de la década de los ochenta, mantiene y programa equipos computacionales de sondeo geológico. <http://hermes.cs.uh.edu/~fchris/>