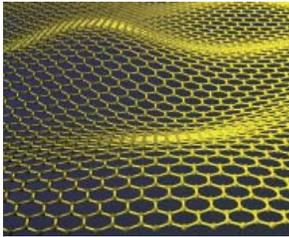


# Propiedades y aplicaciones del grafeno

Claramaría Rodríguez González, Oxana Vasilievna Kharissova  
Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL  
okhariss@mail.uanl.mx, claramaria@hotmail.com



## RESUMEN

*El grafeno es un nuevo material nanométrico bidimensional, obtenido en 2004 por exfoliación micromecánica del grafito. Es una hojuela cuasiplana con pequeñas ondulaciones, dando la apariencia de un panal de abejas, con un grosor de un átomo de carbono (0.1 nm). Su producción está, hasta hoy, restringida a nivel laboratorio, sin embargo, se realizan arduas investigaciones para producirlo a escala industrial debido a las extraordinarias propiedades que exhibe, tales como un efecto Hall cuántico anómalo, un comportamiento como semiconductor gap superficial y ausencia de localización electrónica, entre otras, las cuales se vislumbran que serán de gran utilidad en computación, electrónica y ecología. En este artículo se hace una descripción del grafeno y sus propiedades, así como de su obtención y aplicaciones.*

## PALABRAS CLAVE

Grafeno, propiedades, aplicaciones, síntesis.

## ABSTRACT

*Graphene is a two dimensional new nanomaterial. It was obtained in 2004 from graphite by using a technique called micromechanical cleavage. Graphene is a quasiflat atomically thin sheet covered in tiny ripples packed into a honeycomb lattice, which is only the thickness of an atom (0.1 nm). Its production is limited to laboratories, nevertheless, a great deal of research to produce graphene on a large scale has been conducted due to their unusual electronic, mechanical and chemical properties, such as an anomalous quantum Hall effect, absence of localization of its charge carriers, a zero-gap semiconductor, among others. These properties suggest a wide range of applications in electronic, computer sciences and ecology. This article presents a description of graphene and its properties, as well as obtention methods and applications.*

## KEYWORDS

Graphene, properties, applications, synthesis.

## INTRODUCCIÓN

Los nanomateriales han acaparado el interés de la investigación científica de las últimas dos décadas, debido al descubrimiento de propiedades disímiles a las que ofrecen los macromateriales, dando lugar al advenimiento de una nueva rama del saber científico: la nanotecnología. El espectro de posibilidades de su aplicación es de amplitud y versatilidad tal que inauguran una verdadera revolución tecnológica.

Nanomateriales es el nombre genérico con que se designa a las partículas de una dimensión igual o menor a una millonésima de milímetro. Pueden ser obtenidas a partir de diferentes elementos o compuestos químicos.<sup>1</sup> El carbono, por ser el elemento más conocido e intrigante de la Tabla Periódica, es el que ha focalizado en mayor grado la atención científica a este respecto. El carbono tiene varias formas alotrópicas (figura 1). Alotropía, en química, es la existencia, especialmente en el estado sólido, de dos o más formas estructurales moleculares o cristalinas de un elemento. Los alótropos del carbono pueden ser:

- Tridimensionales – diamante, grafito;
- Bidimensionales – grafeno;
- Monodimensionales – nanotubos;
- Cero dimensionales –fullerenos.<sup>2</sup>

Esta alotropía tan extensa se debe a la capacidad de los átomos de carbono para formar redes muy complicadas y numerosas diversas estructuras.

### ESTRUCTURA DEL GRAFENO

El grafeno es una estructura nanométrica, bidimensional, de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie uniforme, ligeramente

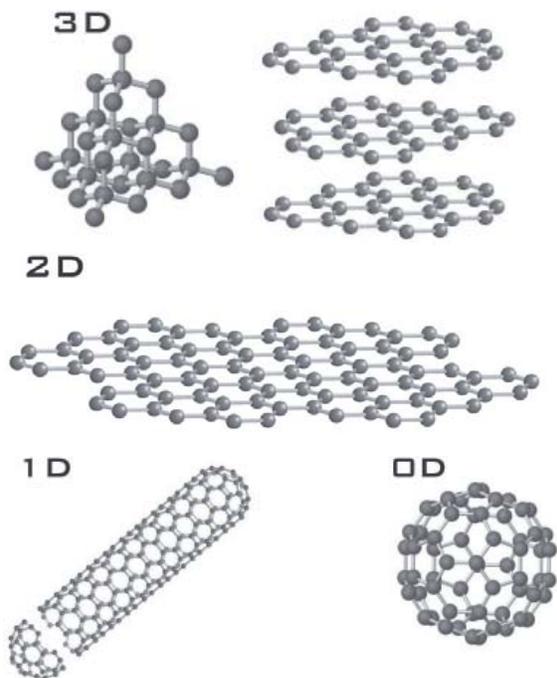


Fig. 1. Formas alotrópicas del carbono. Diamante y grafito(3D); grafeno(2D); nanotubos(1D); fullerenos (0D).<sup>2</sup>

plana, con ondulaciones, de un átomo de espesor, con una apariencia semejante a una capa de panal de abejas por su configuración atómica hexagonal<sup>3</sup> (figura 2).

De esta configuración o arreglo peculiar se desprenden propiedades electrónicas, mecánicas y químicas excepcionales del grafeno. Tomando un fragmento de la figura anterior, mostramos algunas relaciones importantes que se presentan entre sus átomos de carbono (figura 3).

En (a),  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  son vectores unitarios en el espacio real, y en (b),  $\vec{b}_1$  y  $\vec{b}_2$  son vectores de la red recíproca. En las coordenadas X y Y, de la figura, los vectores unitarios del espacio real  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  de la configuración hexagonal están expresadas como

$$\vec{a}_1 = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} a, \frac{a}{2} \right) \quad \vec{a}_2 = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} a, -\frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

donde  $a = |\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = 1.42 \times \sqrt{3} = 2.46 \text{ \AA}$  es la constante de configuración del grafeno.

Análogamente, los vectores unitarios  $\vec{b}_1$  y  $\vec{b}_2$ , de la red recíproca están dados por

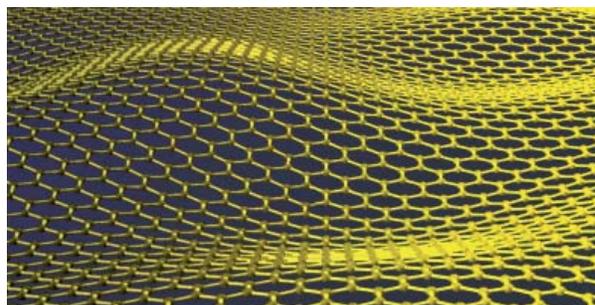


Fig. 2. Estructura bidimensional del grafeno.<sup>4</sup>

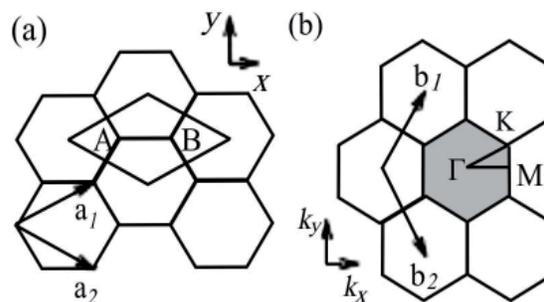


Fig. 3. a) La celda unitaria y b) zona de Brillouin del grafeno:  $\vec{a}_i$  y  $\vec{b}_i$ , ( $i = 1, 2$ ) son vectores unitarios y vectores de la red recíproca, respectivamente. Las relaciones de dispersión de energía son obtenidas a lo largo del perímetro del triángulo punteado conectando los puntos de alta simetría  $\Gamma$ , K y M.<sup>5</sup>

$$\vec{b}_1 = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{a} \right), \vec{b}_2 = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, -\frac{2\pi}{a} \right) \quad (2)$$

correspondiente a una constante de configuración de  $\frac{4\pi}{\sqrt{3}a}$  en el espacio recíproco. Los tres puntos de alta simetría  $\Gamma$ , K y M forman un triángulo que se utiliza para calcular las relaciones de dispersión de energía.<sup>5</sup>

Lo que confiere al grafeno de una singular importancia -entre otros aspectos- es que puede considerarse como el bloque constructor a partir del cual se forman todos los demás materiales grafíticos. Si se le envuelve a manera del forro de un balón, proporciona fullerenos; si se le enrolla cilíndricamente, nanotubos; si se le superpone tridimensionalmente, grafito. Aunque los científicos conocían de su existencia como parte constitutiva de estos últimos y de haberlo estudiado teóricamente desde mediados del siglo pasado, su obtención en estado libre sólo fue posible desde hace tres años, acontecimiento que de inmediato centralizó la atención de la investigación científica y el interés empresarial encaminados a su producción a nivel industrial dadas sus propiedades ya probadas teóricamente.<sup>2</sup> Este hecho inaugura lo que podría considerarse una revolución tecnológica por sus vastas aplicaciones en el mundo moderno.

## MÉTODOS DE OBTENCIÓN

El grafeno en estado libre fue obtenido por vez primera, en 2004, mediante *micromechanical cleavage* (exfoliación micromecánica).<sup>2</sup>

Exfoliación es la separación de la capa más externa de un sólido en laminillas, hojuelas o escamas. La técnica de exfoliación micromecánica consiste en lo siguiente: a la superficie limpia, nueva, tersa, de un cristal de grafito -el grafito es un material constituido por un gran número de placas superpuestas de cristales de grafeno débilmente unidas- se le somete a un raspado fino, de arriba abajo, mediante el empleo de cualquier objeto de superficie sólida, o bien, al descascaramiento repetido utilizando cinta adhesiva con el propósito de extraer hojuelas extremadamente delgadas unidas a estos objetos.<sup>6</sup>

La mayoría de éstas son hojuelas tridimensionales, es decir, son grafito; sin embargo, entre éstas se hayan también bidimensionales, o sea, grafeno. Para

identificar tentativamente a estas últimas, se utiliza microscopía óptica, aprovechando la característica de los cristallitos bidimensionales de volverse visibles en la parte superior de una hoja delgada -oblea- de óxido de silicio, y producir un débil contraste de interferencia de color con respecto a una oblea vacía. Para su identificación definitiva, se selecciona, de entre las hojuelas obtenidas en el paso anterior, aquéllas que exhiban un grosor aparente de aproximadamente la distancia intercapas en los correspondientes cristales tridimensionales y se les analiza utilizando microscopía de fuerza atómica y microscopía electrónica de barrido (figura 4).

Posteriormente, para confirmar que las hojuelas -cristallitos bidimensionales- permanecieron sin ninguna degradación en condiciones ambientales por un período largo, se les analiza mediante microscopía electrónica de tunelamiento, microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión de alta resolución.<sup>1</sup> La base del éxito en la aplicación de esta técnica para obtener grafeno es cumplir puntualmente con las siguientes condiciones: seleccionar cuidadosamente el material grafítico inicial, usar superficies limpias y raspado fresco del grafito, y medir con exactitud el grosor del óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ).<sup>6</sup> Esta técnica se emplea no sólo para aislar el grafeno, sino para investigar otros diferentes cristales bidimensionales (BN,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$  y  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}$ ) en busca de nuevos fenómenos y aplicaciones.<sup>1</sup>

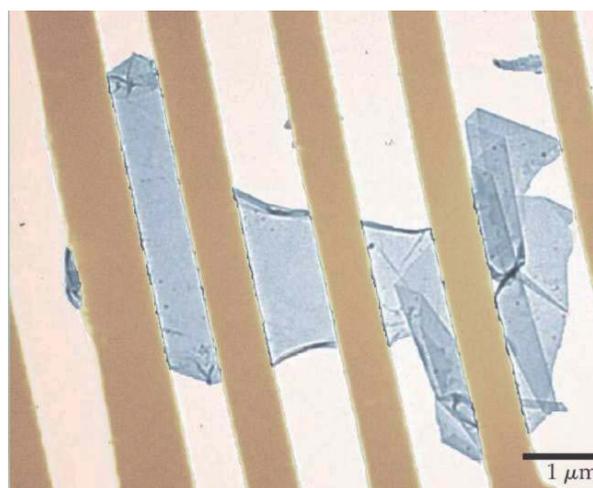


Fig. 4. Cristal de grafeno de un átomo de grosor libremente suspendido en una estructura de alambres de oro, tal como es observado utilizando microscopía de transmisión electrónica.<sup>7</sup>

Los primeros intentos por aislar el grafeno se concentraron en la aplicación de la técnica de exfoliación química, que consiste en insertar, intercalándolos, moléculas o átomos en la masa de grafito, de tal manera que los planos de grafeno puedan ser separados en capas unidos a las moléculas o átomos insertados. Generalmente lo que se obtiene es grafito, pero si la molécula insertada en los planos atómicos del grafito es grande y proporciona una separación mayor, los compuestos resultantes son capas de grafeno unidas a la capa de grafito formando un lecho o cama, aunque la probabilidad de éxito de que así ocurra es baja.

Después, mediante una reacción química, se separan los átomos o moléculas que se insertaron obteniéndose un sedimento consistente de residuos y hojas de grafeno enrolladas. Sin embargo, del sedimento grafitico resultante no se ha podido aislar grafeno en estado libre, debido a que las monocapas sólo existen en estado transitorio e implican separación sobre regiones microscópicas. Por otro lado, según Novoselov: “Los más recientes estudios de grafito exfoliado químicamente han mostrado que sus sedimentos consisten de residuos y hojas de múltiples capas enrolladas en lugar de monocapas individuales”.<sup>6</sup> Este método, por no permitir un control riguroso del sedimento grafitico, ha atraído mínimamente la atención.

Se ha intentado cultivar grafeno usando el mismo procedimiento empleado para el crecimiento de nanotubos de carbono, pero sólo se han producido películas de grafito de más de cien capas de grosor. El grafeno de monocapa o de pocas capas que se ha hecho crecer epitaxialmente por deposición química de vapor y por decomposición térmica de SiC no se ha caracterizado suficientemente.<sup>6</sup> Sin embargo, en este método de crecimiento epitaxial se centran hoy día grandes expectativas de aplicación electrónica.

Aunque el método de exfoliación micromecánica provee grandes cristalitas de grafeno (hasta de 100 nm) de alta calidad con el que se cubren las necesidades a nivel laboratorio, a escala de producción industrial se continúan perfeccionando otros métodos mediante los cuales se obtenga un rendimiento redituable, entre estos pueden citarse: el de exfoliación de compuestos grafiticos intercalados y el de sublimación de Si a partir de sustratos de SiC, ya probados en etapa de laboratorio.<sup>2</sup>

## PROPIEDADES DEL GRAFENO

Caracterizar un material es definir sus propiedades con respecto a parámetros fisicoquímicos, de éstos la dimensionalidad,<sup>1</sup> la conductividad eléctrica, la cualidad microscópica, la continuidad macroscópica, la resistividad y la estabilidad termodinámica son algunos de los más representativos. Por tanto, para caracterizar el grafeno es necesario, precisamente, someterlo a un análisis riguroso determinando el grado en que estos parámetros se manifiestan.

El grafeno pertenece a un extenso grupo de materiales bidimensionales.<sup>8</sup> Es el más estudiado teóricamente y el que, por las propiedades inusuales que presenta, mejor se ha caracterizado.<sup>2</sup> Constituye la punta de lanza en el estudio de estos materiales en la búsqueda de nuevas propiedades y aplicaciones.

El grafeno es un material formado por capas, que comprende desde una hasta 10 capas superpuestas.<sup>6</sup> Sus propiedades están en función de su dimensionalidad. Tomando como base discriminatoria la especificidad de sus propiedades, el grafeno puede ser clasificado en 3 tipos: monocapa, bicapa y aquél que se haya en el rango de 3 a 10 capas.<sup>6</sup> Sin embargo, presentan un conjunto de propiedades comunes que permiten caracterizar los tres tipos como grafeno. Entre estas últimas están:

### Comportamiento metálico y efecto de campo eléctrico

Siendo el grafeno una forma alotrópica del carbono (el carbono por ser un elemento no metálico, es mal conductor de la electricidad) presenta, sin embargo, propiedades que corresponden a los metales, comportándose como semiconductor gap superficial o como semimetal de pequeño traslape,<sup>1</sup> además, esta “propiedad del grafeno se revela en un acentuado efecto campo eléctrico ambipolar tal, que los conductores de carga pueden ser modulados continuamente entre electrones y huecos en concentraciones tan altas como  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  y sus movilidades pueden exceder  $15000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  incluso bajo condiciones ambientales”,<sup>8</sup> pudiendo éstas llegar hasta  $\approx 100000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  si se eliminan las impurezas que generan dispersión, lo que lo convierte en un excelente conductor; mientras que otros materiales bidimensionales ( $\text{Bi}_2 \text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ) son altamente aislantes y ninguna conductividad

inducida fue detectada incluso en entradas de campos eléctricos tan altos como 0.3 V/nm.<sup>1</sup>

### Electrones del grafeno semejantes a fermiones Dirac sin masa

Un fermión es una partícula subatómica (electrones, protones o neutrones) que tiene un spin de 1/2 entero y se rige por principios estáticos que establecen que sólo una en un conjunto de partículas idénticas puede ocupar un estado cuántico particular, a no ser que posea un spin distinto. Un spin es el momento angular intrínseco de una partícula subatómica (aquí nos referiremos al electrón específicamente), es decir que aunque los electrones giren a la misma velocidad de rotación, que vale 1/2, su eje de rotación puede ser distinto, lo que explica que en un campo magnético unos electrones se desvíen hacia un lado y otros hacia el contrario, por lo que debe especificarse esta desviación (estado de spin) para cada electrón en concreto.

Para los fermiones Dirac carentes de masa, el gap es cero<sup>6</sup> y “existe una relación estrecha entre el spin y el movimiento de la partícula: el spin sólo puede ser dirigido a lo largo de la dirección de propagación (digamos, por partículas) o sólo opuesto a él (por antipartículas). Pero, las partículas con masa de  $-1/2$  spin pueden tener dos valores de spin proyectados sobre cualquier eje”<sup>9</sup> generándose partículas cargadas sin masa. El hecho de que los electrones en el grafeno se comporten como partículas relativísticas sin masa en reposo y viajen a  $10^6$  m/s requieren ser descritas como partículas relativísticas llamadas fermiones Dirac carentes de masa;<sup>10</sup> estas partículas pueden ser visualizadas como electrones que han perdido su masa en reposo o como neutrinos que adquirieron la carga electrónica.<sup>10</sup>

El origen de estas partículas se debe a la interacción de los electrones de carbono con el potencial (la energía de una partícula derivada de su posición) periódico dado por la estructura de panal del grafeno (simetría de cristal) produciendo cuasipartículas que, a bajas energías, se describen exactamente por la ecuación Dirac, por lo que son llamadas fermiones Dirac carentes de masa,<sup>2</sup> regidas por la siguiente ecuación para la expresión del espectro de energía:

$$E_{\nu\sigma} = \pm \sqrt{2|e|B\hbar v_f^2} \left( \nu + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

donde  $v_f$  es la velocidad del electrón,  $\nu = 0, 1, 2, \dots$  es el número cuántico y el término con  $\pm \frac{1}{2}$  está relacionado con la quiralidad.

El efecto Hall cuántico anómalo es la evidencia más directa para asegurar la existencia de los fermiones Dirac carentes de masa en el grafeno.

### Un efecto Hall cuántico anómalo

Se conoce como efecto Hall cuántico al estándar internacional de resistencia eléctrica empleado para caracterizar los materiales conductores de la electricidad. Es utilizado para determinar tanto el signo como los portadores de carga.

Para efectos explicativos conviene que el efecto Hall cuántico se le relacione con el efecto Hall el cual se establece mediante el siguiente procedimiento: al material a investigar por el cual se hace pasar una corriente eléctrica se le aplica perpendicularmente un campo magnético provocándose que los portadores de carga se acumulen en un determinado sitio, generándose un campo eléctrico. Midiendo la diferencia de potencial en las dos superficies del material es posible deducir el signo y la densidad de los portadores de carga, presentándose una linealidad entre el campo magnético y la resistencia Hall.<sup>11</sup>

El efecto Hall cuántico ofrece, por lo contrario, como característica la no linealidad entre la resistencia de Hall y el campo magnético, es decir, que el efecto Hall cuántico se presenta mediante una serie de escalones o peldaños al aplicársele campos magnéticos altos y bajas temperaturas (figura 5).

La particularidad que muestra el grafeno es que al comportarse como fermiones Dirac carentes de masa es la existencia de estados de energía cero lo cual conduce a un efecto Hall cuántico anómalo con una cuantización de  $1/2$  entero de la conductividad Hall en lugar de una de un entero.

### Quiralidad

Debido a la simetría de cristal exhibida por el grafeno sus cuasipartículas deben ser descritas por funciones de onda de dos componentes en virtud de las contribuciones relativas de las dos subredes en la formación de cada una. Pero el espín en el grafeno indica la subred más que el espín real de los electrones surgiendo lo que es conocido como

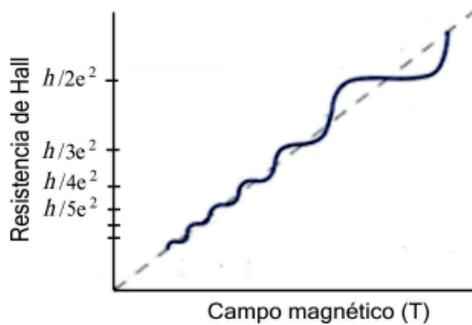


Fig. 5. Efecto Hall cuántico. La línea punteada muestra el comportamiento clásico esperado; los pasos el comportamiento cuántico.<sup>11</sup>

un pseudoespín. Este pseudoespín nos permite introducir el término de quiralidad, definido como la proyección del pseudoespín en la dirección del movimiento siendo positivo para los electrones y negativo para los huecos.<sup>12</sup>

Esta propiedad es muy importante porque permite explicar muchos procesos electrónicos y dos nuevos (quirales) efectos cuánticos: una conductividad cuántica mínima en el límite de concentraciones desvanecientes de conductores de carga, y una supresión fuerte de efectos de interferencia cuántica.<sup>12</sup>

### Paradoja Klein

De acuerdo con la teoría clásica una partícula no puede propagarse a través de una región donde su energía potencial es más grande que su energía total. Sin embargo, los electrones obedecen las leyes de la mecánica cuántica, según las cuales el electrón rebotará efectivamente contra la barrera, pero además hay una probabilidad finita de que también “atravesase” la barrera en un proceso denominado efecto de túnel y de que aparezca del otro lado.<sup>11</sup>

Sorpresivamente en el caso del grafeno la probabilidad de transmisión del electrón es siempre igual a 1 independientemente de la altura y anchura de la barrera. Esta conducta en electrodinámica cuántica es conocida como la paradoja Klein.<sup>12</sup>

### APLICACIONES DEL GRAFENO

La naturaleza quiral del grafeno bicapa o monocapa, de gran importancia para la transmisión de electrones por túnel a través de barreras potenciales

(por razón de su posición, en contraposición al movimiento), ofrece la posibilidad para construir dispositivos tales como transistores de carbono.<sup>2</sup>

Debido a que las muestras de grafeno producidas son de tan excelente calidad que el efecto Hall cuántico y el transporte balístico pueden ser observados fácilmente, lo convierten en un buen prospecto para confeccionar transistores balísticos (un transistor balístico es aquel en el cual los electrones son disparados sin ninguna colisión entre ellos, significando mayores velocidades y menor energía requerida).<sup>10</sup>

A causa de un acoplamiento órbita-spin irrelevante, la polarización spin en el grafeno subsiste en distancias submicrométricas, lo cual lo convierte en material ideal para producir dispositivos de válvula spin.<sup>2</sup>

Una aplicación del grafeno bicapa en este momento consiste en utilizar su capacidad para absorber moléculas de gas de la atmósfera (sensores de gas de estado sólido) lo cual resulta en el dopaje con electrones o huecos dependiendo de la naturaleza del gas absorbido. Monitoreando los cambios en la resistividad, se puede determinar con exactitud las concentraciones de ciertos gases presentes en la atmósfera, con expectativas muy grandes en el área de control de la contaminación.<sup>2</sup>

Otra aplicación es mezclar polvo de grafeno obtenido de cristallitos micrométricos no coagulados con plástico produciendo materiales conductores de electricidad a bajos costos y con una variedad muy grande de usos,<sup>6</sup> o el uso de polvo de grafeno en baterías eléctricas derivado de su alta conductividad y una relación grande superficie-volumen que conduce a un mejor eficacia de las baterías.<sup>6</sup>

También merece señalarse que el grafeno, por ser un material ideal para producir spin qubits, ofrece grandes expectativas en computación cuántica, además de que puede utilizarse como almacén de hidrógeno dada su gran capacidad de absorber grandes cantidades de este gas.<sup>6</sup> Así mismo para producir hojas conductivas, en las cuales varias estructuras nanométricas pueden ser curvadas para hacer un circuito de transistores de electrón simple,<sup>6</sup> aprovechando la ventaja de que los canales de conducción, puntos cuánticos, barreras e intercomunicadores pueden ser trazados en una hoja de grafeno.<sup>6</sup>

Por último, hay avances notables en la síntesis de hojas de óxido de grafeno que ofrecen posibilidades de uso en la confección de membranas con permeabilidad controlada, en conductores iónicos anisotrópicos, en superconductores y en materiales para almacenaje molecular, entre otros muchos usos.<sup>13</sup> En la figura 6 se muestra una hoja de óxido de grafeno.

Resulta pertinente asentar que las aplicaciones expuestas arriba son estrictamente potenciales, se infieren como dimanantes de las propiedades inusuales mostradas por el grafeno, pero en este momento, y dado que este material es relativamente nuevo, su estudio está circunscrito a las etapas de caracterización y obtención a nivel laboratorio.

### COMENTARIOS FINALES

El grafeno es un nuevo material bidimensional, sintetizado en estado libre hace apenas tres años (2004). Aunque se conocía teóricamente su existencia, las propiedades que exhibe han despertado un inusitado entusiasmo de investigadores y empresarios por producirlo a escala industrial dadas sus potenciales promisorias aplicaciones en electrónica, computación y ecología, entre otras importantes áreas. Su eficiencia y economía en consumo de energía ya han sido probadas a nivel laboratorio y rebasan con mucho a los materiales actualmente en uso en las ramas tecnológicas ya mencionadas. El trabajo de investigación de este material que ha centrado tanto el interés científico e

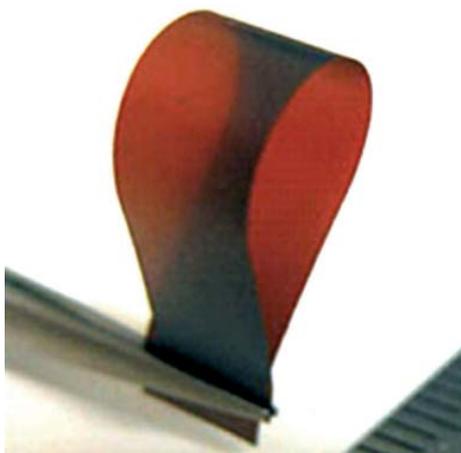


Fig. 6. Hoja de óxido de grafeno.<sup>13</sup>

industrial se halla en las primeras etapas; el camino es largo pero se está avanzando con celeridad.

### REFERENCIAS

1. Novoselov, K. S., D. Jiang et al. Two dimensional atomic crystals, PNAS (United Kingdom y Rusia), 2005, Vol.102, núm.30, pp. 10451-10453.
2. Katsnelson, Mikhail I. Graphene: carbon in two dimensions, Materials today (Países Bajos), 2007, Vol.10, núm 1-2, pp. 20-27.
3. Novoselov, K. S., A. K. Geim et al. Electric field effect in atomically thin carbon films, Science (UK y Rusia), 2004, Vol.306, pp. 666-669.
4. Gómez-Esteban, Pedro. La fiebre del grafeno. <http://eltamiz.com/2007/04/10/la-fiebre-del-grafeno/> Consultada el 17 de diciembre de 2007.
5. Saito, R., G. Dresselhaus y M.S. Dresselhaus. Physical properties of carbon nanotubes, Imperial college press, Singapur, 2a. reimpr. de la 1a. ed. de 1998, pp. 24-25.
6. Geim, A. K. y K. S. Novoselov. The rise of graphene, Nature materials (UK), 2007, Vol.6, pp. 183-191.
7. Geim, K.A. y A. H. Mac Donald. Graphene: Exploring carbon flatland, Physics Today, 2007, p. 35.
8. Novoselov, K. S., A. K. Geim et al. Two – dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, Nature materials (UK), 2005, Vol.438, núm 10, pp.197-200.
9. Artús, P. y R. Crehuet. Mecánica Cuántica un viaje al universo subatómico, oceano, España, 2001, p.p. 74-76.
10. Geim Andre. Electrons lose their mass in carbon sheets, Nature materials (UK), 2005, Vol. 438, pp. 165-167.
11. Resnick, R., D. Halliday y K. S. Krane. Física, CECSA, México, 4ª.ed., 2003, pp.736.
12. Katsnelson, M.I., K.S. Novoselov y A. K. Geim. “Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene”, Nature materials (UK), 2006, Vol.2, pp.620-625.
13. Dikin, D.A., S. Skantovich, et. al. “Preparation and characterization of graphene oxide paper” Nature materials (USA), 2007, Vol.448, pp.457-460.